



**TUGAS AKHIR- TL 141584**

# **SIMULASI 3D TEGANGAN SISA DAN DISTORSI PADA PENGELASAN SUDU TURBIN BERBAHAN INCONEL 792 DENGAN METODE FINITE ELEMENT**

**MUHAMMAD ZAKI HAUNA**  
**NRP. 2711 100 084**

**Dosen Pembimbing**  
**Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., P.hD.**  
**Ir. Rochman Rochiem, M.Sc**

**JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI**  
**FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI**  
**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**  
**SURABAYA**  
**2016**



**TUGAS AKHIR- TL 141584**

**SIMULASI 3D TEGANGAN SISA DAN DISTORSI PADA  
PENGELASAN SUDU TURBIN BERBAHAN INCONEL 792  
DENGAN METODE FINITE ELEMENT**

**MUHAMMAD ZAKI HAUNA  
NRP. 2711 100 084**

**Dosen Pembimbing  
Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., P.hD.  
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc**

**JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2016**



**FINAL PROJECT- TL 141584**

**3D SIMULATION OF RESIDUAL STRESS AND  
DISTORTION ON TURBINE BLADE WELDING MADE OF  
INCONEL 792 USING FINITE ELEMENT METHOD**

**MUHAMMAD ZAKI HAUNA  
NRP. 2711 100 084**

**Advisor**

**Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., P.hD.  
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc**

**DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALLURGICAL  
ENGINEERING  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2016**

**SIMULASI 3D TEGANGAN SISA DAN DISTORSI PADA  
PENGELASAN SUDU TURBIN BERBAHAN INCONEL  
792 DENGAN METODE FINITE ELEMENT**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Metalurgi Manufaktur  
Program Studi – S1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**MUHAMMAD ZAKI HAUNA**

NRP. 2711 100 084

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

1. Mas Irfan Purbawanto  
Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D. (Pembimbing I)
2. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc. (Pembimbing II)



**JANUARI 2016**

# 3D SIMULATION OF RESIDUAL STRESS AND DISTORTION ON TURBINE BLADE WELDING MADE OF INCONEL 792 USING FINITE ELEMENT METHOD

Name : Muhammad Zaki Hauna  
NRP : 2711100084  
Department : Materials & Metallurgical Engineering  
Advisor : Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., P.hD.  
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.

## *Abstract*

Welding is one of the common fabrication method used to joining two or more materials. Other than that, it also used to repair damaged materials by adding filler to the broken parts. This research simulated the residual stress and distortions in turbine blade made of Inconel 792 and repaired through welding process, using finite element based software – ANSYS 15.0. The welding sequence and interpass temperature were varied to obtain the best welding result. The welding sequences were "unidirectional and multi-directional" and the interpass temperatures are 473 K, 673 K, and 873 K. According to the result, the greatest residual stress obtained was 607 MPa when using the heat input power 10.646.581 J/m<sup>2</sup>. Meanwhile, the greatest distortion was 0,133 mm. Considering the results of this research, using the parameters as above experiment in repairing turbine blade through welding process, the cracking can be minimized during the process.

**Keywords:** Distortion, heat input, finite element simulation, residual stress, welding sequence



# **SIMULASI 3D TEGANGAN SISA DAN DISTORSI PADA PENGELASAN SUDU TURBIN BERBAHAN INCONEL 792 DENGAN METODE FINITE ELEMENT**

Nama : Muhammad Zaki Hauna  
NRP : 2711100084  
Jurusan : Teknik Material & Metalurgi  
Dosen Pembimbing : Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., P.hD.  
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.

## ***Abstrak***

Pengelasan merupakan salah satu metode fabrikasi yang banyak digunakan untuk menyambung suatu material. Disamping itu, las juga dapat dimanfaatkan untuk perbaikan komponen material yang mengalami pengurangan dimensi dengan cara menambahkan bagian tersebut dengan material filler las. Pada penelitian ini, pemodelan dilakukan guna menginvestigasi tegangan sisa dan distorsi pada pengelasan perbaikan sudu turbin berbahan Inconel 792. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan bantuan software *finite element* yaitu ANSYS 15.0. Variasi yang dilakukan berupa pola pengelasan (*welding sequence*) dan temperatur interpass saat proses pengelasan berlangsung. Pola pengelasan dilakukan dengan dua metode, yaitu pengelasan searah dan bolak – balik. Sedangkan variasi temperatur interpass yang digunakan adalah 473 K, 673 K, dan 873 K. Dari hasil penelitian, tegangan sisa terbesar memiliki nilai 607 MPa. Tegangan sisa tersebut dihasilkan dari heat input sebesar 10.646.581 J/m<sup>2</sup>. Sedangkan distorsi terbesar dari pengelasan memiliki nilai 0,133 mm. Dengan mempertimbangkan hasil penelitian ini, maka proses perbaikan sudu turbin Inconel 792 dapat meminimalisir terjadinya retakan yang terjadi pada proses pengelasan Inconel 792.

***Kata Kunci:*** Distorsi, *heat input*, pemodelan *finite element*, tegangan sisa, *welding sequence*

## KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakaatuh,

Segala puji syukur senantiasa kita panjatkan atas pertolongan dan kehendak yang telah Allah berikan kepada penulis dalam proses menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul

**“Simulasi 3D Tegangan Sisa dan Distorsi Pada Pengelasan Sudu Turbin Berbahan Inconel 792 dengan Metode *Finite Element*”**

Tugas Akhir ini disusun untuk melengkapi syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Material & Metalurgi – Fakultas Teknologi Industri – Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Ditengah kelemahan dan kekurangan yang kami miliki, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua Orang tua penulis, Muhammad Jauharul Fuad dan Diah Rosanty yang senantiasa menjadi penyemangat setiap kebaikan dan pengingat beragam kekhilafan penulis. *Terima kasih, mah pah.*
2. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, ST., MT., Ph.D. dan Bapak Ir. Rochman Rochiem, M.Sc., selaku dosen pembimbing penulis yang selalu menyediakan waktu untuk memberikan ilmu dan pengalamannya.
3. Bapak Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng sebagai Ketua Jurusan Teknik Material & Metalurgi.
4. Bapak Tubagus Noor Rohmannudin, ST., M.Sc. selaku dosen wali penulis.

5. Seluruh bapak ibu dosen dan karyawan di lingkungan Teknik Material & Metalurgi yang tak kenal lelah mencetak generasi-generasi terbaik unggulan bangsa.

6. Mas Nanang dan mas Fahmi dari PT. GMF AeroAsia yang memberikan kesempatan bagi penulis untuk mengerjakan topik Tugas Akhir ini.

7. Sahabat terdekat, keluarga terhebat, tempat berbagi penat dan melebur tanpa sekat ku, MT 13. Terima kasih untuk tak pernah lelah bersama. *Venceremos!*

8. Kepingan mozaik terakhir yang Allah berikan di penghujung waktu perkuliahan, seluruh fungsionaris BEM ITS 2015. *Terima kasih kalian, barisan para mantan.*

9. Seluruh orang-orang hebat yang selalu mengisi kekurangan penulis selama belajar di kampus perjuangan, tanpa terkecuali. Terima kasih telah berkanan menjadi cerita dalam hidup penulis.

Penulis berharap dengan selesainya Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan khazanah ilmu pengetahuan kedepan, khususnya di bidang Pemodelan Material Jurusan Teknik Material & Metalurgi. *Hanya karya lah yang menjadikan manusia senantiasa hidup dalam kematiannya.*

Surabaya, 2016

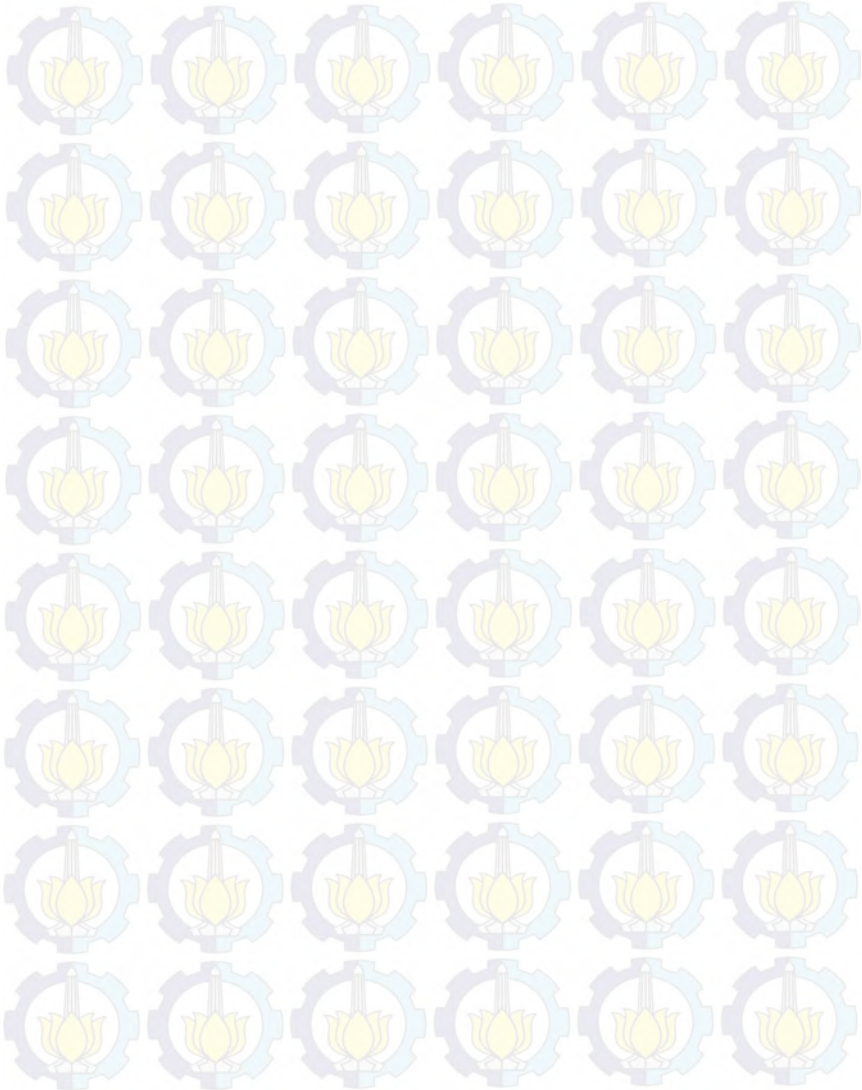
Penulis



# DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PENGESAHAN.....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xiii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
I.1. Latar Belakang .....	1
I.2. Perumusan Masalah .....	3
I.3. Batasan Penelitian .....	3
I.4. Tujuan Penelitian .....	4
I.5. Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
II.1. Pemodelan Pengelasan Menggunakan Finite Element .....	5
II.2. Superalloy Welding at Elevated Temperature.....	7
II.3. Perpindahan Panas Dalam Proses Pengelasan.....	10
II.4. Tegangan Sisa dari Proses Pengelasan .....	12
II.5. Distorsi Pengelasan.....	16
II.6. Persamaan Finite Element Untuk Analisa Termal dan Struktur .....	18
<b>BAB III MATERIAL DAN METODE</b>	
III.1. Metode Penelitian .....	21
III.2. Material Turbin dan Parameter Pengelasan .....	22
III.3. Pemodelan dengan ANSYS 15.0 .....	27
<b>BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN</b>	
IV.1. Simulasi Pembebanan Termal .....	29
IV.1.1. Simulasi Pengelasan/Pembebanan Termal.....	29
IV.1.2. Analisa Distribusi Temperatur.....	34
IV.2. Simulasi Pembebanan Struktur.....	42
IV.2.1 Simulasi Pembebanan Struktur .....	42
IV.2.1 Analisa Pembebanan Struktur.....	43
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1 Kesimpulan.....	57
5.2 Saran.....	57
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>xv</b>

**LAMPIRAN..... xv**  
**BIODATA PENULIS.....xxxiii**



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b> Kondisi pengelasan <i>Superalloy Welding at Elevated Temperature</i> .....	9
<b>Gambar 2. 2</b> Ilustrasi skema perubahan temperatur dan tegangan sisa.....	13
<b>Gambar 2. 3</b> Hubungan antara tegangan sisa dan distorsi .....	16
<b>Gambar 2. 4</b> Perubahan yang terjadi selama proses pengelasan .....	17
<b>Gambar 3. 1</b> Flowchart Penelitian (1) .....	21
<b>Gambar 3. 2</b> Flowchart Penelitian (2) .....	22
<b>Gambar 3. 3</b> Geometri turbin setelah dilakukan meshing .....	23
<b>Gambar 3. 4</b> Geometri las pada turbin .....	24
<b>Gambar 3. 5</b> Flowchart pemodelan menggunakan Software Ansys 15.0.....	27
<b>Gambar 4. 1</b> Geometri layer pada pengelasan.....	31
<b>Gambar 4. 2</b> Perbedaan profil distribusi temperatur pengelasan pola bolak-balik dan searah pada detik ke 24. Gambar (a) merupakan pola pengelasan bolak-balik sedangkan gambar (b) menunjukkan pola pengelasan non searah .....	33
<b>Gambar 4. 3</b> Profil distribusi temperatur dengan pola pengelasan bolak-balik dan temperatur interpass 473 K pada (a) detik ke 6 dan (b) detik ke 24 .....	37
<b>Gambar 4. 4</b> Profil distribusi temperatur dengan pola pengelasan searah dan temperatur interpass 473 K pada (a) detik ke 6 dan (b) detik ke 24 .....	37
<b>Gambar 4. 5</b> Profil distribusi temperatur dengan pola pengelasan bolak-balik dan temperatur interpass 673 K pada (a) detik ke 6 dan (b) detik ke 24 .....	37
<b>Gambar 4. 6</b> Profil distribusi temperatur dengan pola pengelasan searah dan temperatur interpass 673 K pada (a) detik ke 6 dan (b) detik ke 24 .....	38
<b>Gambar 4. 7</b> Profil distribusi temperatur dengan pola pengelasan bolak-balik dan temperatur interpass 873 K pada (a) detik ke 6 dan (b) detik ke 24 .....	38



<b>Gambar 4. 8</b>	Profil distribusi temperatur dengan pola pengelasan searah dan temperatur interpass 873 K pada (a) detik ke 6 dan (b) detik ke 24 .....	38
<b>Gambar 4. 9</b>	Siklus termal pengelasan bolak-balik dengan temperatur interpass 473 K di daerah weld metal dan sekitarnya .....	39
<b>Gambar 4. 10</b>	Distribusi temperatur pada saat pemanasan layer 1 pada detik ke 1 dengan arah pengelasan pada sumbu x .....	40
<b>Gambar 4. 11</b>	Distribusi temperatur pada saat pendinginan temperatur kamar setelah 48 detik .....	40
<b>Gambar 4. 12</b>	Posisi pengeangan/ <i>clamp</i> pada analisa struktur .....	42
<b>Gambar 4. 13</b>	Grafik tegangan arah sumbu x pada pengelasan bolak-balik dengan temperatur interpass 473 K.....	43
<b>Gambar 4. 14</b>	Distribusi tegangan ( $\sigma_x$ ) pada pengelasan bolak-balik dengan temperatur interpass 473 K di (a) $t = 1$ detik, (b) $t = 24$ detik, dan (c) $t = 72$ detik .....	46
<b>Gambar 4. 15</b>	Distribusi tegangan ( $\sigma_x$ ) pada pengelasan searah dengan temperatur interpass 473 K di (a) $t = 1$ detik, (b) $t = 24$ detik, dan (c) $t = 72$ detik .....	47
<b>Gambar 4. 16</b>	Grafik tegangan sisa pada pengelasan sudu turbin Inconel 792 .....	50
<b>Gambar 4. 17</b>	Distorsi yang terjadi di daerah sudu turbin (tampak isometric) pada pengelasan bolak-balik dengan temperatur interpass 473 K.....	51
<b>Gambar 4. 18</b>	Distorsi yang terjadi di daerah sudu turbin (tampak belakang) pada pengelasan bolak-balik dengan temperatur interpass 473 K.....	52
<b>Gambar 4. 19</b>	Grafik nilai distorsi pada pengelasan bolak-balik dengan temperatur interpass 473 K.....	53
<b>Gambar 4. 20</b>	Grafik distorsi pada pengelasan sudu turbin Inconel 792.....	54

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b> Harga koefisien efisiensi busur las untuk beberapa metode pengelasan .....	11
<b>Tabel 3. 1</b> Kekuatan Mekanik Inconel 792 .....	24
<b>Tabel 3. 2</b> Sifat Termal Inconel 792 .....	25
<b>Tabel 3. 3</b> Komposisi Kimia Inconel 792 .....	26
<b>Tabel 3. 4</b> Prosedur Pengelasan .....	27
<b>Tabel 4. 1</b> Kondisi variasi simulasi heat input .....	32
<b>Tabel 4. 2</b> Distribusi temperatur pada daerah weld metal .....	34
<b>Tabel 4. 3</b> Temperatur tertinggi masing-masing variasi pengelasan .....	41
<b>Tabel 4. 4</b> Tegangan sisa tarik dan kompresi maksimum pada pengelasan sudu turbin Inconel 792 .....	50
<b>Tabel 4. 5</b> Distorsi total terbesar pada pengelasan sudu turbin Inconel 792 .....	54



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

Pada bab ini dibahas mengenai hal-hal yang berkaitan dengan latar belakang, rumusan masalah, batasan penelitian, tujuan, dan manfaat penelitian Tugas Akhir ini.

### **I.1. Latar Belakang**

Inconel 792 merupakan salah satu jenis paduan nikel (*nickel-base superalloy*) yang memiliki kekuatan mekanik dan ketahanan rangkak (*creep*) yang baik hingga mendekati temperatur lelehnya. Selain itu, material ini juga memiliki ketahanan terhadap korosi dan oksidasi yang baik sehingga banyak ditemui pada aplikasi turbin pesawat terbang. Selama pengoperasiannya, berbagai kemungkinan kerusakan dapat terjadi akibat kelelahan termo mekanik pada struktur, korosi akibat panas, dan erosi. Erosi merupakan masalah yang paling sering kali ditemui pada turbin. Pengelasan menjadi salah satu metode perbaikan yang dapat digunakan dalam permasalahan tersebut selain dengan mengganti secara keseluruhan part yang mengalami kerusakan.

Pengelasan yang dilakukan pada Inconel 792 sendiri membutuhkan perlakuan khusus karena material ini rentan mengalami keretakan (*crack*) pada saat berada pada temperatur tinggi selama proses pengelasan berlangsung (Suharno, 2013). Guna menyelesaikan permasalahan tersebut dikembangkanlah suatu



## LAPORAN TUGAS AKHIR BAB I PENDAHULUAN

---

metode pengelasan baru yaitu *Superalloy Welding at Elevated Temperatur* (SWET). Pada metode SWET ini, benda kerja dipanaskan sebelum dan selama berlangsungnya proses pengelasan dengan menggunakan *conduction coil* untuk meningkatkan temperatur awal benda kerja sebelum di las. Temperatur pemansan yang digunakan harus lebih tinggi dibandingkan temperatur aging benda kerja yang digunakan, yaitu Inconel 792. Hal ini bertujuan untuk menghindari terjadinya retakan yang timbul akibat gradien termal yang tinggi (Sugiharto, 2012).

Guna mendapatkan hasil penelitian yang baik terhadap proses pengelasan SWET pada material Inconel 792 ini, dilakukan simulasi pemodelan tegangan sisa dan distorsi yang terjadi pada proses pengelasan. Beberapa dekade belakangan ini, telah banyak dilakukan eksperimen dan pemodelan dengan menggunakan konsep Metode Elemen Hingga atau *Finite Element Method* (FEM) yang bertujuan untuk mengamati tegangan sisa dan distorsi pada proses pengelasan. Gannon, dkk (2010) melakukan studi tentang pengaruh urutan pengelasan terhadap distorsi pengelasan sambungan T-Joint. Selain itu, pemodelan pada material berbahan paduan nikel juga pernah dilakukan sebelumnya. Danis, dkk (2010) melakukan penelitian pemodelan pengelasan material berbahan Inconel seri 738LC guna mengamati tegangan sisa yang dapat memicu retak panas selama proses berlangsung.

Metode pemodelan secara numerik ini banyak dilakukan dalam dunia pengelasan karena dapat menjadi bahan evaluasi yang



efektif dan efisien dalam penelitian. Namun, studi yang banyak dilakukan berfokus pada pengelasan-pengelasan sambungan antar material. Penelitian mengenai pengelasan guna menambah bagian material dengan menggunakan *filler* las masih minim dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan mampu menjadi referensi penelitian kedepan dalam menambah khazanah keilmuan khususnya dalam dunia pemodelan pengelasan.

## **I.2. Perumusan Masalah**

Berdasarkan apa yang telah diuraikan pada latar belakang diatas, maka dapat diketahui perumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana temperatur puncak (*peak temperature*) yang terjadi pada simulasi pengelasan SWET turbin berbahan Inconel 792?
2. Bagaimana tegangan sisa yang terjadi pada simulasi pengelasan SWET turbin berbahan Inconel 792?
3. Bagaimana distorsi yang terjadi pada simulasi pengelasan SWET turbin berbahan Inconel 792?

## **I.3. Batasan Penelitian**

Untuk mendapatkan hasil perhitungan yang sesuai dengan fenomena fisik yang terjadi pada proses pengelasan di lapangan, maka terdapat beberapa batasan masalah yang perlu diperhitungkan sebagaimana berikut:





1. Material turbin yang dimodelkan dianggap homogen
2. Kecepatan pengelasan pada simulasi dianggap konstan
3. Arus listrik dan tegangan yang digunakan pada simulasi dianggap konstan
4. Material filler yang digunakan pada simulasi pengelasan sama dengan material base metal yaitu Inconel 792

#### **I.4. Tujuan Penelitian**

Tujuan yang dilaksanakan pada penelitian ini adalah:

1. Menganalisa temperatur puncak (*peak temperature*) yang terjadi pada simulasi pengelasan SWET turbin berbahan Inconel 792
2. Menganalisa tegangan sisa yang terjadi pada simulasi pengelasan SWET turbin berbahan Inconel 792
3. Menganalisa distorsi yang terjadi pada simulasi pengelasan SWET turbin berbahan Inconel 792

#### **I.5. Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat yang didapatkan dari penelitian ini adalah didapatkannya informasi mengenai tegangan sisa dan distorsi dari proses pengelasan SWET turbin. Hal ini diharapkan dapat menjadi rujukan metode yang efektif dalam melakukan perbaikan kerusakan turbin pada industri MRO (*Maintenance, Repairing, and Overhaul*) pesawat terbang.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

Pada penelitian ini, proses pengelasan yang dilakukan bertujuan untuk memperbaiki bagian sudu turbin yang patah dengan cara menambahkan bagian tersebut dengan proses pengelasan. Mekanisme terjadinya tegangan sisa dan distorsi pengelasan dijelaskan bersama metode pengelasan SWET, perpindahan panas pada pengelasan, dan persamaan yang digunakan dalam analisa numerik menggunakan *Finite Element Method* di bawah.

#### **II.1. Pemodelan Pengelasan Menggunakan Finite Element**

Ditengah perkembangan zaman yang begitu pesat, kemajuan teknologi di bidang ilmu sains (*science*) dan rekayasa (*engineering*) memberikan peranan penting dalam kehidupan. Kemajuan teknologi memiliki andil yang besar dalam membantu manusia menyelesaikan pekerjaan mereka dengan lebih efektif dan efisien. Salah satu bidang ilmu rekayasa yang mengalami banyak pengembangan adalah pengelasan. Beragam upaya dalam mengembangkan teknologi las terus dilakukan untuk memperluas ruang lingkup pemakaian yang semakin beragam di dunia industri. Salah satu rekayasa yang banyak dilakukan para insiyur adalah mengembangkan metode analisa kualitas pengelasan yang dihasilkan. Metode yang umum digunakan adalah dengan menggunakan pengujian merusak (*destructive test*) dan atau pengujian tidak merusak (*non destructive test*). Namun,





kedua metode tersebut juga memiliki beberapa kekurangan. Salah satunya adalah tidak mampu menganalisa tegangan sisa yang ditimbulkan dari pengelasan secara akurat. Padahal tegangan sisa dari hasil pengelasan berpengaruh terhadap sifat-sifat mekanis struktur las seperti patah getas, kelelahan, dan retak.

Guna menganalisa hasil las, dapat dilakukan dengan metode elemen hingga atau *finite element method* (FEM) yang efektif untuk memprediksi tegangan sisa, *heat affected zone*, dan kekuatan tarik dari produk-produk pengelasan. Dalam beberapa tahun belakangan, penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa aplikasi FEM memiliki keandalan yang sesuai dengan tujuan yang diharapkan (Mahiskar, dll. 2014).

Mert (2011) melakukan studi tentang pengaruh perbedaan proses pengelasan pada distorsi. Hasil penelitiannya menunjukkan proses pengelasan yang dilakukan berulang menghasilkan distorsi yang lebih besar ketimbang pengelasan sekali jalan (*single pass welding*). Schenk (2009) mengemukakan hasil penelitiannya yang membahas tentang pengaruh penjepitan pada distorsi pengelasan. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa penjepitan dan urutan pengelasan berpengaruh pada distorsi yang dihasilkan. Syahroni dan Hidayat (2011) melakukan penelitian pengaruh variasi urutan pengelasan sambungan las T-Joint pada distribusi temperatur, tegangan sisa, dan distorsi. Distorsi dan tegangan sisa paling rendah didapatkan dari urutan pengelasan yang dimulai dari bagian tengah sumbu las material. Faktor lain yang berpengaruh pada distorsi



pengelasan adalah transformasi fasa. Penelitian Deng (2009) menunjukkan bahwa transformasi fasa memiliki pengaruh yang besar terhadap tegangan sisa dan distorsi pada baja karbon menengah, tetapi pengaruh tersebut menjadi kecil saat diaplikasikan pada baja karbon rendah.

## **II.2. Superalloy Welding at Elevated Temperature**

Metode pengelasan yang dilakukan pada penelitian ini membutuhkan perhatian khusus karena material Inconel 792 pada turbin memiliki sifat mampu las yang rendah sehingga rentan mengalami retak (*hot cracking*) saat proses pengelasan berlangsung. Hal ini telah menjadi topik perhatian dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Suharno, dkk (2013). Melihat fenomena yang terjadi, terus dilakukan pengembangan proses perbaikan sudu turbin berbahan Inconel 792 dengan metode pengelasan guna mendapatkan hasil las yang lebih baik. Sugiharto, dkk (2012) menemukan suatu metode pengelasan baru yang dapat diterapkan dalam aplikasi pengelasan material berbahan Inconel 792 ini. Metode yang digunakan Sugiharto adalah dengan menggunakan *Superalloy Welding at Elevated Temperature* (SWET).

*Superalloy*, seperti yang sudah dibahas sebelumnya, merupakan material yang memiliki sifat sulit untuk diaplikasikan pengelasan. Kesulitan yang dimaksud adalah tingginya kemungkinan terjadinya cacat pada hasil pengelasan. SWET merupakan inovasi yang masih minim diterapkan dalam pengelasan material *cast*



## LAPORAN TUGAS AKHIR BAB II TINJAUAN PUSTAKA

---

*superalloy*. Proses aplikasi dari SWET ini hampir mirip dengan metode pengelasan *interpas*. Pengelasan dilakukan dengan terlebih dahulu melakukan pemanasan benda kerja hingga mencapai temperatur tertentu dan mempertahankan panas tersebut selama proses pengelasan dilakukan. Dalam pengaplikasian prosedur SWET ini, dianjurkan menggunakan temperatur yang lebih tinggi dari temperatur aging yang dimiliki material. Untuk material *superalloy*, pemanasan biasanya dilakukan pada suhu 500 °C – 1010 °C. Hal ini dilakukan untuk menghindari terjadinya fasa presipitat Inconel 792 (gamma primer,  $\gamma'$ ) yang menyebabkan pengerasan material. Fasa presipitat ini lah yang kemudian menyebabkan material mengalami pengerasan. Saat proses pengelasan berlangsung, pengerasan tersebut bertemu dengan tegangan sisa yang muncul akibat ketidakseragaman temperatur sehingga mengakibatkan munculnya retakan panas. Kombinasi dari pengerasan dan tegangan yang terbentuk dari proses pengelasan dapat menyebabkan keretakan pada produk.

Pemanasan sebelum dilakukan pengelasan atau *preheating* juga dapat mengurangi gradient termal yang timbul pada saat pengelasan berlangsung. Jika terjadi pemanasan yang terlalu cepat atau mendadak, fase batas butir tidak dapat melewati proses peleburan sempurna dengan matrix sekelilingnya. Peleburan parsial atau tidak menyeluruh ini dapat menyebabkan terbentuknya titik eutektik yang memiliki titik didih rendah dan melelehnya bagian batas butir. Dilusi lokal pada fase batas butir dapat mengakibatkan terjadinya *liquation cracking* atau *fissuring*. Keuntungan lain dari





SWET ini adalah mengurangi laju pendinginan yang terjadi setelah selesainya proses pengelasan. Hal ini dapat menghasilkan struktur metalurgi yang lebih elastis dengan resistensi yang lebih kuat terhadap keretakan.



**Gambar 2. 1** Kondisi pengelasan *Superalloy Welding at Elevated Temperature*

Teknik pengelasan yang digunakan dalam metode SWET adalah teknik *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW). GTAW adalah proses pengelasan yang menggunakan busur yang terbentuk antara elektroda tungsten (*non-consumable*) dengan genangan las. Teknik GTAW telah menjadi suatu alat yang tak tergantikan dikarenakan kualitas dari hasil pengelasan yang diproduksi serta biaya peralatan yang relatif rendah. GTAW dapat digunakan untuk mengelas lebih banyak jenis material dibandingkan teknik lainnya, terutama logam yang memiliki paduan yang banyak. Dari keseluruhan material yang



ada, GTAW dapat menghasilkan produk yang sukses khususnya pada material stainless steel, aluminum, nickel dan titanium. Ini merupakan alasan terutama mengapa teknik GTAW dipilih untuk aplikasi perbaikan yang akan dilakukan.

### II.3. Perpindahan Panas Dalam Proses Pengelasan

Pada kenyataannya, dalam proses pengelasan yang terjadi tidak semua panas pada elektroda las berpindah pada lapisan *base metal*. Sumber panas pada elektroda tersebar ke lingkungan di sekelilingnya, selain untuk memanaskan *base metal* itu sendiri. Secara matematis, sumber panas elektroda yang mampu diserap oleh sumbu las ditulis sebagai berikut (Pilipenko, 2001)

$$Q = \eta UI \quad (2-1)$$

Dimana  $Q$  adalah *heat input*, [W];  $\eta$  adalah koefisien efisiensi busur las;  $U$  adalah tegangan busur [V]; dan  $I$  adalah arus busur [A].

Harga koefisien efisiensi busur las untuk beberapa metode pengelasan ditunjukkan pada tabel 2.1.





**Tabel 2. 1** Harga koefisien efisiensi busur las untuk beberapa metode pengelasan (sumber: Pilipenko, 2001)

Metode pengelasan							
$\eta$	<i>SAW, baja</i>	<i>SMAW, baja</i>	<i>GMAW, CO<sub>2</sub>-baja</i>	<i>GMAW, Ar-baja</i>	<i>GTAW, Ar-baja</i>	<i>GTAW, He-Al</i>	<i>GTAW, Ar-Al</i>
	0,91 - 0,99	0,66 - 0,85	0,75 - 0,93	0,66 - 0,70	0,25 - 0,75	0,55 - 0,80	0,22 - 0,46

Salah satu persamaan dasar perpindahan panas adalah Hukum Fourier tentang konduksi. Hukum Fourier menunjukkan hubungan antara intensitas *heat flow*  $q_2$  [J/m<sup>2</sup>s] dengan gradien temperatur  $\frac{\partial T}{\partial n}$  [K/m]. Hal ini menunjukkan bahwa panas pada suatu benda solid mengalir dari bagian yang panas menuju bagian yang dingin.

$$q_2 = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2-2)$$

Dimana  $\lambda$  adalah koefisien konduktivitas panas, [J/msK]. Besarnya koefisien ini bergantung pada komposisi kimia, struktur mikro dan temperatur yang bekerja.

Pada pengelasan, proses perpindahan panas yang terjadi bukan hanya meliputi peristiwa konduksi, melainkan juga konveksi. Peristiwa konduksi terjadi antara permukaan benda kerja yang mengalami kontak secara langsung dengan elektroda. Sedangkan konveksi terjadi antara permukaan benda kerja dengan fluida di



sekelilingnya (pada kasus pengelasan, fluida yang dimaksudkan adalah udara).

Secara matematis, persamaan dasar konduksi pada benda pejal adalah sebagai berikut.

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = Q_G + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (2-3)$$

Dimana  $c$  adalah panas spesifik (*specific heat*), [J/kgK];  $\rho$  adalah densitas material, [kg/m<sup>3</sup>] dan  $Q_G$  adalah debit perubahan temperatur, [W/m<sup>3</sup>].

Pada simulasi distribusi temperatur, perpindahan panas yang terjadi dipengaruhi oleh besarnya *heat flux* pada elemen. Secara matematis, persamaan *heat flux* adalah sebagai berikut.

$$q_{el} = q_o \frac{A_{el}}{A_o} \quad (2-4)$$

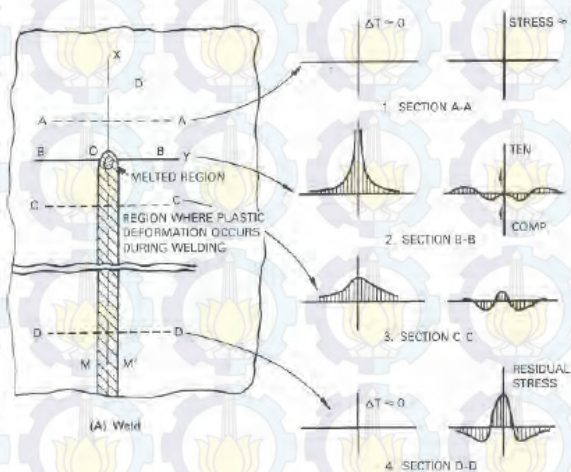
Dimana  $q_{el}$  adalah heat fluks pada elemen, [J/m<sup>2</sup>];  $q_o$  adalah heat fluks yang dihasilkan elektroda, [J/m<sup>2</sup>];  $A_{el}$  adalah luas permukaan elemen, [m<sup>2</sup>], dan  $A_o$  luas permukaan elektroda, [m<sup>2</sup>].

#### II.4. Tegangan Sisa dari Proses Pengelasan

Secara umum, istilah tegangan sisa merujuk pada jumlah tegangan yang membebani material walaupun tidak adanya pembebanan eksternal yang dilakukan (Masubuchi, 1980). Pada



proses pengelasan, tegangan sisa muncul karena perbedaan temperatur yang signifikan selama proses pemanasan dan pendinginan. Pada saat proses pemanasan terjadi pencairan logam induk pada daerah las yang menyebabkan terjadinya peregangan. Namun peregangan yang terjadi tidak berlangsung secara sempurna karena bagian lain pada logam induk yang tidak menerima panas seolah-olah menahan peregangan tersebut. Dari fenomena ini, timbulah dua tegangan yang berbeda pada logam induk, yaitu tegangan tekan (*compression*) pada daerah yang mengalami pemanasan, dan tegangan tarik (*tension*) pada daerah yang tidak mengalami pemanasan. Hal ini berlangsung pula pada proses pendinginan setelah pengelasan dengan peristiwa yang berkebalikan (Rahmat dan Pintowantoro, 2007)



**Gambar 2. 2**Ilustrasi skema perubahan temperatur dan tegangan sisa  
(sumber: Masabuchi, 1980)





## LAPORAN TUGAS AKHIR BAB II TINJAUAN PUSTAKA

---

Ilustrasi mekanisme pembentukan tegangan sisa pada pengelasan sambungan plat ditunjukkan pada gambar 2.2. Arah lasan berjalan searah dengan sumbu x. Pengelasan dilakukan dengan menggerakkan busur las dengan kecepatan  $v$ , dan dimulai dari titik O sebagaimana ditunjukkan pada gambar section A-A. Distribusi temperatur sepanjang garis lasan ditunjukkan pada gambar section B-B. Sedangkan gambar section C-C menunjukkan tegangan yang dihasilkan.

Sepanjang titik A-A material belum mengalami pengaruh panas sedangkan titik B-B merupakan bagian yang memiliki distribusi temperatur yang paling tinggi yaitu daerah yang mencair tepat pada garis lasan terjadi tegangan tekan (*compression*) sedangkan di sisi kanan dan kiri dari garis lasan terjadi tegangan tarik (*tension*). Pada daerah yang dengan temperatur yang mulai mengalami penurunan (daerah C-C), sepanjang daerah garis lasan terjadi tegangan tarik pada sisi kanan dan tegangan tekan pada sisi kirinya. Demikian pula pada daerah D-D. Daerah tersebut merupakan daerah yang sudah mengalami proses pendinginan dan mengakibatkan terjadinya tegangan tarik tepat pada daerah garis lasan dan tegangan tekan pada sisi kanan dan kiri lasan. Tegangan tarik yang terjadi pada daerah D-D tetap tertahan pada material lasan dan tinggal secara permanen sebagai *residual stress* atau tegangan sisa (Masabuchi, 1980).

Tegangan sisa pada kondisi 2D dapat ditunjukkan pada persamaan dibawah.



$$\epsilon_x = \epsilon_x' + \epsilon_x''$$

$$\epsilon_y = \epsilon_y' + \epsilon_y''$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{xy}' + \gamma_{xy}''$$

(2-5)

Dimana:

$\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$  adalah komponen regangan total

$\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$  adalah komponen regangan elastis

$\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$  adalah komponen regangan plastis

Dan hubungan antara tegangan dan regangan elastis berdasarkan Hukum Hooke adalah:

$$\epsilon_x' = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y)$$

$$\epsilon_y' = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x)$$

$$\gamma_{xy}' = \frac{1}{G} \tau_{xy}$$

(2-6)

Tegangan diatas harus memenuhi kondisi setimbang sebagai berikut:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0$$

(2-7)

Regangan total harus memenuhi kondisi sebagai berikut:

$$\left[ \frac{\partial^2 \epsilon_x'}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_y'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \gamma_{xy}'}{\partial x \partial y} \right] + \left[ \frac{\partial^2 \epsilon_x''}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_y''}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \gamma_{xy}''}{\partial x \partial y} \right] = 0 \quad (2-8)$$

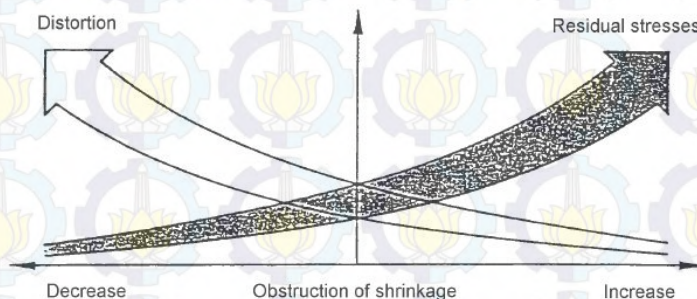




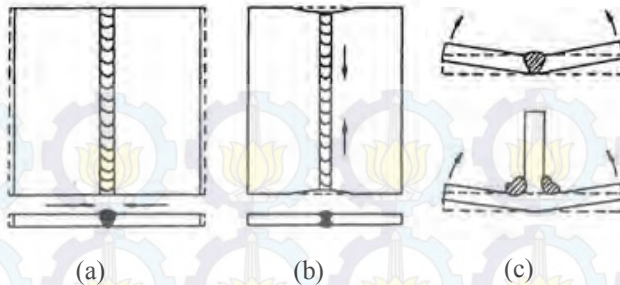
Pada persamaan (2-8), perhitungan kedua merupakan perhitungan untuk mendefinisikan besar regangan plastis. Selama besarnya tidak nol maka hal itu menunjukkan bahwa terdapat tegangan sisa disana.

## II.5. Distorsi Pengelasan

Distorsi berkaitan erat dengan besar tegangan sisa yang terjadi selama proses pengelasan. Hubungan antara distorsi dan tegangan sisa ditunjukkan pada gambar 2.3. Daerah las yang memiliki derajat pengekangan (*degree of restraint*) memiliki keuntungan distorsi yang rendah pula, namun berkebalikannya justru tegangan sisa yang dimiliki menjadi semakin besar. Adapun sebaliknya, jika derajat pengekangan yang dimiliki tinggi, maka distorsi nya pun menjadi semakin tinggi sedangkan tegangan sisanya rendah.



**Gambar 2. 3** Hubungan antara tegangan sisa dan distorsi  
(sumber: International Welding Engineer, 2011)



**Gambar 2. 4** Perubahan yang terjadi selama proses pengelasan (source: [www.kobelco-welding.jp](http://www.kobelco-welding.jp))

Ada tiga perubahan distorsi mendasar yang terjadi pada proses pengelasan yaitu:

1. Penyusutan *Transversal*

Gambar 2.4 (a) adalah distorsi yang tegak lurus terhadap sumbu las

2. Penyusutan *Longitudinal*

Gambar 2.4 (b), adalah distorsi yang paralel dengan sumbu las

3. Perubahan sudut, pada sambungan *T-Joint* dan *butt joint*

Gambar 2.4 (c) merupakan deformasi yang masing-masing terjadi di sekitar daerah lasan. Hal ini terjadi ketika penyusutan transversal tidak sama dengan arah ketebalannya.

Dalam kondisi yang terjadi di lapangan, distorsi pada pengelasan seringkali lebih kompleks dibandingkan dengan teori yang disebutkan diatas. Sebagai contoh, penyusutan secara transversal dan longitudinal hanya dapat terjadi apabila memenuhi beberapa kondisi;



ketebalan benda kerja yang cukup besar dan pusat gravitasi lasan sejalan dengan sumbu netral dari benda kerja. Ketika hal diatas tidak terpenuhi, yang deformasi secara rotasi seperti angular, lentur, dan tekuk dapat saja terjadi.

## II.6. Persamaan Finite Element Untuk Analisa Termal dan Struktur

Persamaan *finite element* untuk mengetahui besar analisa termal yang dilakukan dituliskan sebagaimana berikut:

$$[C]\{T\} + [K]\{T\} = \{F_T\} \quad (2-9)$$

Yang mana:

$$[C] = \int_V \rho C [N]^T [N] dV \quad (2-10)$$

$$[K] = \int_V k [B]^T dV + \int_S h_f [N]^T [N] dS \quad (2-11)$$

$$\{F_T\} = \int_V Q [N]^T dV + \int_S h_f T_{ref} [N]^T [N] dS \quad (2-12)$$

Dimana:

$\rho$  adalah densitas ( $\text{kg/m}^3$ )

$C$  adalah panas spesifik ( $\text{J/kg.K}$ )

$k$  adalah konduktivitas ( $\text{W/m.K}$ )

$h_f$  adalah koefisien panas konvektif ( $\text{W/m}^2.\text{K}$ )

$Q$  adalah tingkat generasi panas internal per satuan volume ( $\text{W/m}^3$ )

$[N]$  adalah matriks fungsi dari bentuk elemen

$[B]$  adalah matriks derivatif





{T} adalah matriks temperatur noda

Hasil dari distribusi temperatur yang didapat dari persamaan 2-9 kemudian dimasukkan ke dalam pemodelan analisa struktur dalam bentuk pembebanan termal. Persamaan struktur *finite element* didapatkan sebagaimana berikut:

$${}^{i+1}[K]_1\{\Delta U\} - {}^{i+1}[K]_2\{\Delta T\} = {}^{i+1}\{R\} - {}^i\{R\}, \quad (2-13)$$

Yang mana:

$$[K]_1 = \int_V [B]^T [D^{ep}] [B] dV \quad (2-14)$$

$$[K]_2 = \int_V [B]^T [D^{th}] [M] dV \quad (2-15)$$

$$\{R\} = \int_S [N]^T \{p\} dS + \int_V [N]^T \{f\} dV \quad (2-16)$$

$$[D^{ep}] = [D^e] + [D^p] \quad (2-17)$$

Dimana:

{ΔU} adalah pemindahan noda

{ΔT} adalah temperatur noda

[B] adalah matriks dari pemindahan regangan

[D<sup>e</sup>] adalah matriks kekakuan elastis

[D<sup>p</sup>] adalah matriks kekakuan plastis

[C<sup>th</sup>] adalah matriks kekakuan termal

[M] adalah fungsi bentuk temperatur

{p} adalah vektor gaya pada permukaan

{f} adalah vektor gaya pada selubung

i adalah analisa langkah yang sedang dilakukan





## LAPORAN TUGAS AKHIR BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Vektor pada *displacement* nodal pada analisa selanjutnya,  $^{i+1}\{U\}$  didapatkan melalui:

$$^{i+1}\{U\} = ^i\{U\} + \{\Delta U\} \quad (2-18)$$

Selanjutnya, kondisi tegangan pada struktur las didapatkan melalui hubungan tegangan regangan sebagai berikut:

$$^{i+1}\{\sigma\} = ^i\{\sigma\} + \{\Delta\sigma\} \quad (2-19)$$

$$\{\Delta\sigma\} = [D^{ep}] [B] \{\Delta U\} + [C^{th}] [M] \{\Delta T\} \quad (2-20)$$

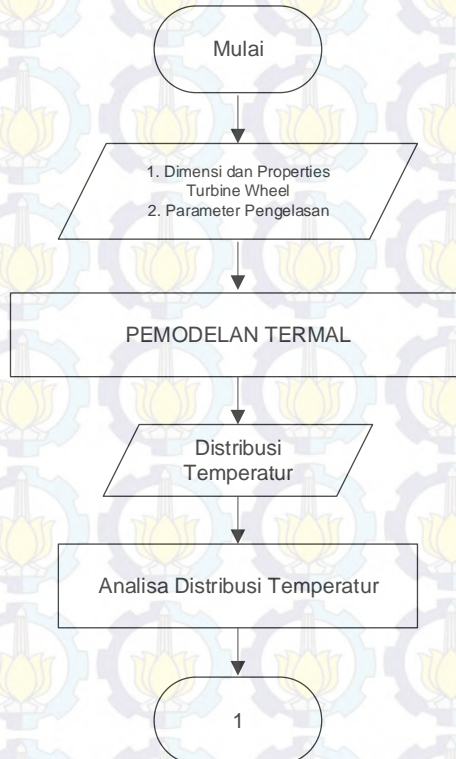
Pada umumnya, metode iterasi Newtho-Raphson digunakan dalam analisa pengerjaan finite element untuk menyelesaikan persamaan non linear.

## BAB III

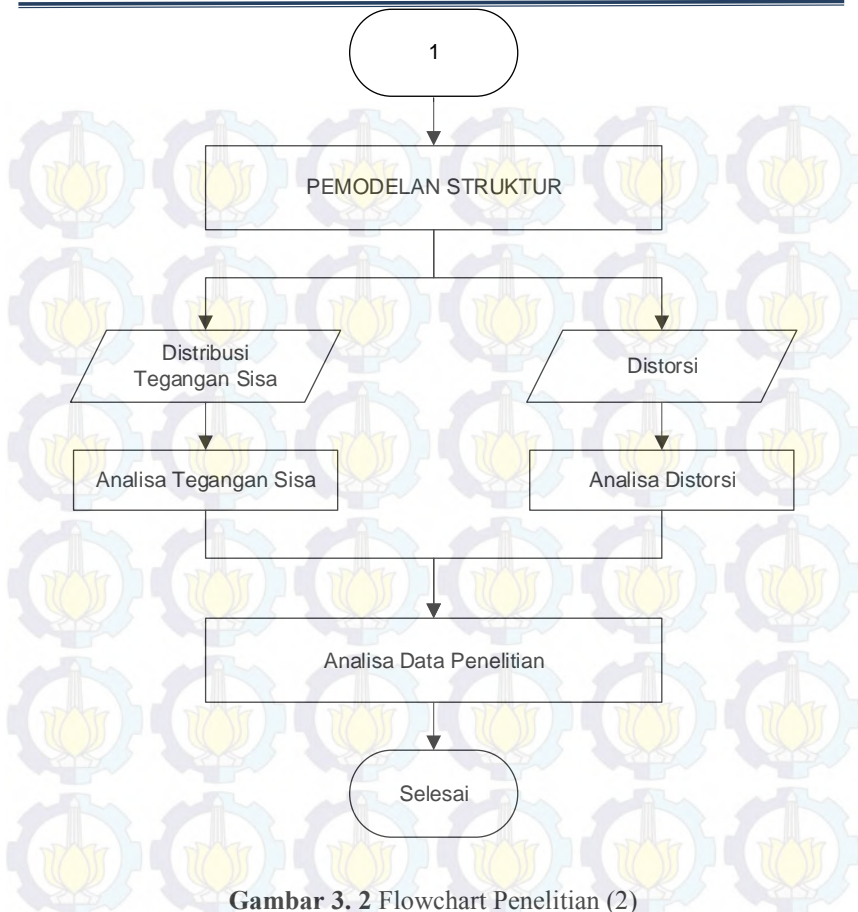
### MATERIAL DAN METODE

Pada Bab ini menjelaskan tentang metode dan kerangka penelitian yang digunakan dalam penelitian, spesifikasi material turbin, beserta pemodelan yang dilakukan menggunakan software *finite element*.

#### III.1. Metode Penelitian



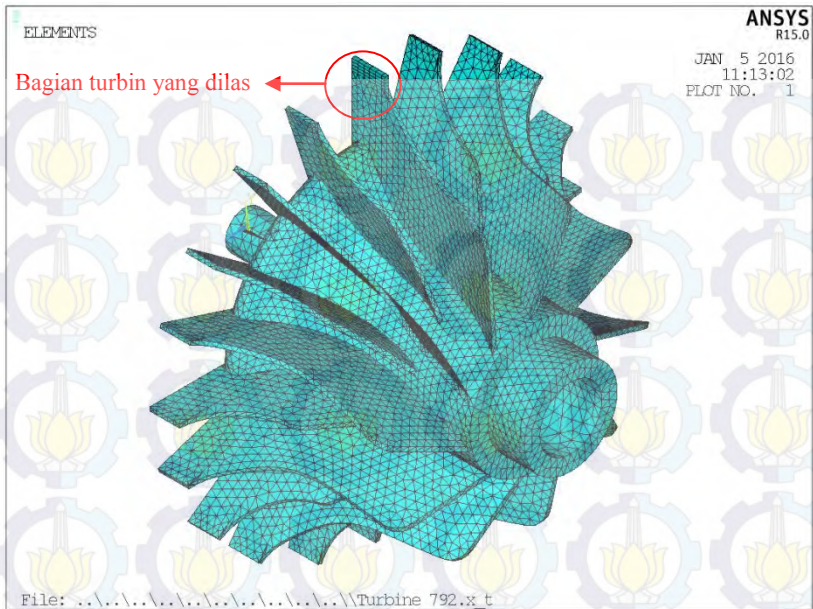
**Gambar 3. 1** Flowchart Penelitian (1)



**Gambar 3. 2** Flowchart Penelitian (2)

### III.2. Material Turbin dan Parameter Pengelasan

Pada pengerjaan simulasi pengelasan ini, material yang digunakan adalah Inconel 792 dengan geometri sebagai berikut:



**Gambar 3. 3** Geometri turbin setelah dilakukan meshing

Turbin diatas memiliki panjang diameter luar 220 mm dan panjang ujung poros ke poros lainnya 178,5 mm. Sedangkan panjang sudu turbinnya adalah 42,7 mm dengan tebal 2 mm dan tinggi 42.7 mm.

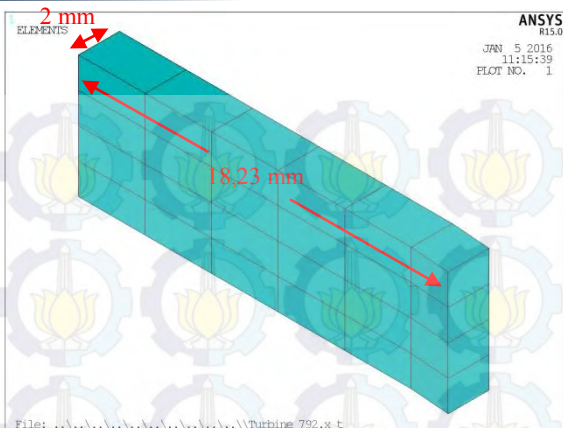
Gambar 3.3 menunjukkan hasil meshing turbin dengan menggunakan pemodelan software *finite element*, ANSYS. Elemen yang digunakan pada simulasi ini adalah elemen SOLID 70 untuk analisa termal dan SOLID 185 untuk analisa struktur.

Pengelasan dilakukan pada bagian ujung sudu turbin yang mengalami patah sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.4. Total panjang sumbu las adalah 18,23 mm dengan jumlah lapisan pengelasan sebanyak 4 layer/lapisan yang memiliki ketebalan las masing-masing 1,5 mm.





## LAPORAN TUGAS AKHIR BAB III MATERIAL DAN METODE



**Gambar 3. 4** Geometri las pada turbin

Selain geometri material diatas, didapatkan pula beberapa data *properties* material yang digunakan dalam analisa termal dan struktur turbin dengan software ANSYS sebagaimana berikut:

**Tabel 3. 1** Kekuatan Mekanik Inconel 792

Temp (K)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Yield Stress (Pa)	UTS (Pa)	E (Pa)	Poisson Ratio
300	8250	$10,6 \times 10^8$	$11,70 \times 10^8$	$983 \times 10^9$	0,294
303		$10,6 \times 10^8$	$11,73 \times 10^8$	$974 \times 10^9$	0,2942
373		$10,5 \times 10^8$	$11,57 \times 10^8$	$954 \times 10^9$	0,291
473		$10,4 \times 10^8$	$11,34 \times 10^8$	$930 \times 10^9$	0,288
573		$10,3 \times 10^8$	$11,10 \times 10^8$	$905 \times 10^9$	0,28
673		$10,2 \times 10^8$	$10,87 \times 10^8$	$876 \times 10^9$	0,28
773		$10,1 \times 10^8$	$10,64 \times 10^8$	$856 \times 10^9$	0,275
873		$9,99 \times 10^8$	$10,41 \times 10^8$	$822 \times 10^9$	0,272
973		$9,89 \times 10^8$	$10,18 \times 10^8$	$798 \times 10^9$	0,273
1073		$9,82 \times 10^8$	$9,94 \times 10^8$	$783 \times 10^9$	0,271
1173		$6,60 \times 10^8$	$8,40 \times 10^8$	$739 \times 10^9$	0,272

# LAPORAN TUGAS AKHIR

## BAB III MATERIAL DAN METODE



1273		$6,14 \times 10^8$	$8,02 \times 10^8$	$685 \times 10^9$	0,271
1373		$5,68 \times 10^8$	$7,64 \times 10^8$	$681 \times 10^9$	0,276
1473		$5,22 \times 10^8$	$7,26 \times 10^8$	$653 \times 10^9$	0,283
1573		$4,77 \times 10^8$	$6,89 \times 10^8$	$625 \times 10^9$	0,292
1673		$4,31 \times 10^8$	$6,51 \times 10^8$	$597 \times 10^9$	0,306

**Tabel 3. 2** Sifat Termal Inconel 792

Temp (K)	Specific Heat (J/Kg.K)	Thermal Conductivity (W/mK)	CTE (ppm/ <sup>0</sup> K)
300	421,5	10,863	$5,46 \times 10^{-6}$
303	423	10,898	$7,32 \times 10^{-6}$
373	462,5	11,720	$11,30 \times 10^{-6}$
473	498,5	12,860	$15,68 \times 10^{-6}$
573	521	13,960	$18,74 \times 10^{-6}$
673	540	15,020	$20,72 \times 10^{-6}$
773	558	16,040	$21,86 \times 10^{-6}$
873	576	17,020	$22,4 \times 10^{-6}$
973	612,5	17,960	$22,58 \times 10^{-6}$
1073	641	18,860	$22,64 \times 10^{-6}$
1173	680	19,720	$22,82 \times 10^{-6}$
1273	710	20,540	$23,26 \times 10^{-6}$
1373	740	21,320	$24,51 \times 10^{-6}$
1473	770	22,060	$26,48 \times 10^{-6}$
1573	800	22,760	$29,54 \times 10^{-6}$
1673	830	23,420	$33,92 \times 10^{-6}$



## LAPORAN TUGAS AKHIR BAB III MATERIAL DAN METODE

**Tabel 3. 3** Komposisi Kimia Inconel 792

Unsur Kimia	IN-792 (%)
C	0,2
Ni	60
Cr	13
Co	9
Mo	2
Fe	-
Al	3,2
B	0,02
Ti	4,2
Ta	3,9
W	4
Zr	0,1

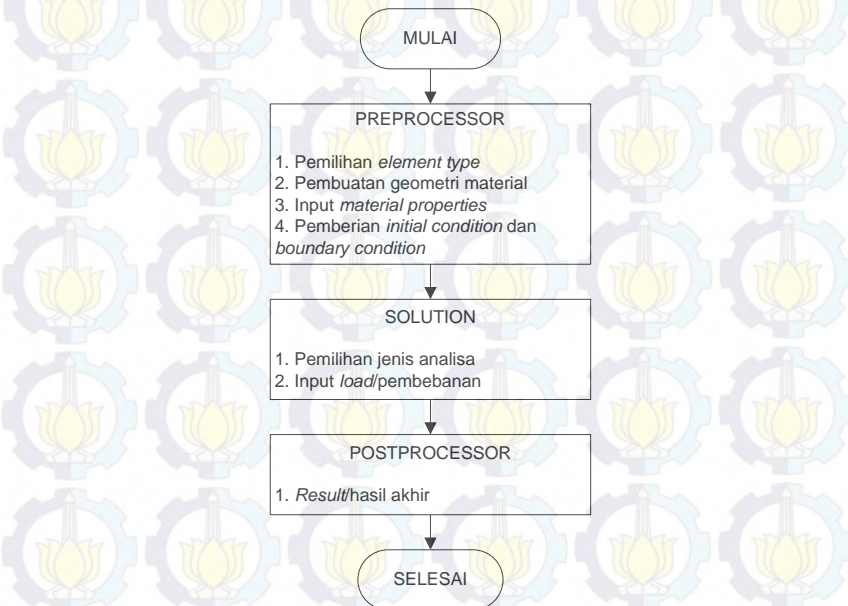
Proses pengelasan yang dilakukan menggunakan metode *Superalloy Welding at Elevated Temperature* (SWET). Metode SWET ini merupakan modifikasi metode GTAW dengan memanaskan benda kerja menggunakan *induction coil* selama pengelasan berlangsung pada temperatur tertentu. Pemanasan dilakukan dengan beberapa variasi temperatur, yaitu 473 K, 673 K, dan 873 K. Kemudian dilakukan pengelasan tanpa mengalami proses pendinginan terlebih dahulu. Adapun material pengisi (*filler*) yang digunakan memiliki diameter 3,25 mm.



**Tabel 3. 4** Prosedur Pengelasan

Metode pengelasan	SWET dengan las GTAW		
Panjang sumbu las	18,23 mm		
Tebal layer las	1,5 mm		
Diameter elektroda	3,25 mm		
Kecepatan pengelasan	3,2 mm/s		
Temperatur Interpass (K)	Variabel Heat Input		
	Luas area elektroda (m <sup>2</sup> )	Voltage (V)	Arus (A)
473	8,29E-6	10	17
673	8,29E-6	10	13
873	8,29E-6	10	11

### III.3. Pemodelan dengan ANSYS 15.0



**Gambar 3. 5** Flowchart pemodelan menggunakan Software Ansys 15.0





## LAPORAN TUGAS AKHIR BAB III MATERIAL DAN METODE

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.5, proses pemodelan material dengan software ANSYS secara garis besar meliputi tiga proses, yaitu: *Preprocessor*, *Analysis*, dan *Postprocessor*. Pada tahap *Preprocessor* dilakukan pembuatan geometri turbin dengan menggunakan software SolidWork yang kemudian dipindahkan ke dalam software ANSYS. Pada tahap ini juga ditentukan *element type*, *material properties*, dan ukuran *meshing* yang digunakan pada benda kerja.

Setelah tahap *preprocessor* selesai, dilakukan proses *analysis*. Pada bab sebelumnya, telah dijelaskan bahwa simulasi pengelasan pada penelitian ini melibatkan dua jenis analisa, yaitu analisa termal dan struktur. Analisa termal dilakukan guna mendapatkan distribusi temperatur pada material sedangkan analisa struktur dilakukan untuk mendapatkan tegangan sisa dan distorsi dari hasil pengelasan. Pada analisa termal, beban yang diberikan adalah heat input pengelasan dan energi yang digunakan untuk mencapai temperatur interpass serta konveksi yang terjadi di permukaan benda kerja. Sedangkan pada analisa struktur, beban yang diberikan adalah *constrain* berupa pengekleman/penjepitan.

Setelah dilakukan proses pembebanan, tahap terakhir adalah *postprocessor* untuk mendapatkan hasil perhitungan dari input yang diberikan secara komputasi oleh ANSYS. Karena analisa yang dilakukan meliputi analisa termal dan struktur, maka perlu dilakukan beberapa pengulangan proses pengerjaan seperti pemberian beban dan material properties.

## **BAB IV**

### **ANALISA DATA & PEMBAHASAN**

Sesuai dengan metode penelitian dan data awal yang telah dibahas pada bab sebelumnya, Bab IV ini menjelaskan hasil simulasi *finite element* yang dilakukan berikut dengan pembahasan hasilnya. Proses pengerjaan simulasi mencakup 25 langkah pengerjaan (*load step*) yang terdiri dari 24 langkah pemanasan/pengelasan dan 1 langkah pendinginan. Pendinginan yang dilakukan berlangsung hingga temperatur benda kerja kembali mendekati temperatur kamar.

#### **IV.1. Simulasi Pembebanan Termal**

##### **IV.1.1. Simulasi Pengelasan/Pembebanan Termal**

Meshing benda kerja dilakukan terlebih dahulu sebelum memberikan beban termal. Meshing dilakukan guna membagi daerah analisa menjadi bagian-bagian yang lebih kecil. Bagian-bagian tersebut digambarkan dalam bentuk elemen dan nodal. Dengan pembentukan elemen dan nodal ini, maka analisa termal dan struktur dapat dilakukan dengan lebih mudah dan mendetail.

Pada penelitian ini, digunakan 2 jenis elemen, yaitu SOLID 70 yang berfungsi sebagai elemen analisa termal dan SOLID 185 yang berfungsi sebagai elemen analisa struktur. Pemilihan kedua jenis elemen ini dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik material dan output analisa yang diinginkan. Pada analisa termal, SOLID 70 mampu memperhitungkan distribusi temperatur dari



## LAPORAN TUGAS AKHIR BAB IV ANALISA DATA & PEMBAHASAN

beban konduksi dan konveksi yang dilakukan selama proses pengelasan. Disamping itu, SOLID 70 juga secara otomatis melakukan *switch* elemen menjadi SOLID 185 pada aplikasi analisa struktur. Untuk analisa struktur digunakan elemen SOLID 185 karena output yang diharapkan adalah tegangan sisa dan distorsi hasil pengelasan.

Pembentukan elemen pada daerah las bergantung panjangnya sumbu las dan kecepatan pengelasan yang dilakukan. Hal tersebut digambarkan dengan pendekatan sebagai berikut:

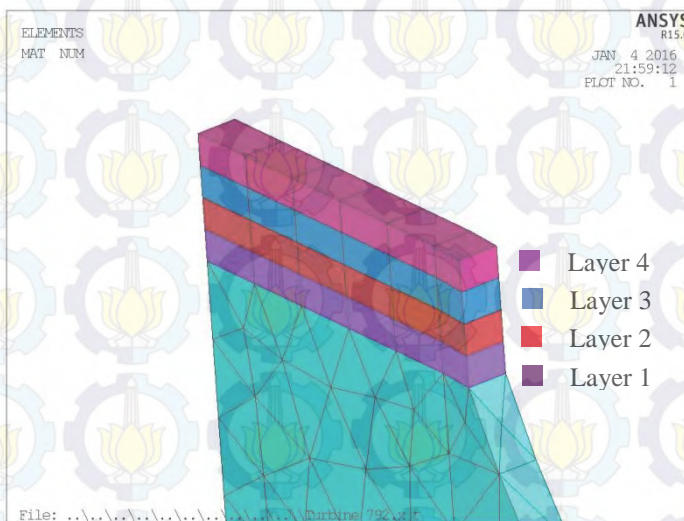
$$\begin{aligned}\text{Jumlah elemen} &= \frac{\text{Panjang sumbu las}}{\text{Kecepatan pengelasan}} \\ &= \frac{18,23}{3,2} \\ &= 6 \text{ (pembulatan)}\end{aligned}$$

Karena proses pengelasan berlangsung sebanyak 4 lapisan, maka total jumlah elemen pada sumbu las adalah  $6 \times 4 = 24$  elemen. Sedangkan jumlah keseluruhan elemen dan nodal yang dihasilkan dalam proses meshing sebanyak 28.449 elemen dan 121.214 nodal.

Heat input yang digunakan pada pembebanan termal ini berupa pemanasan secara konduksi dan konveksi. Pemanasan secara konduksi dilakukan dengan memberikan beban berupa heat flux. Perhitungan dilakukan menggunakan persamaan 2.4 yang memperhitungkan besarnya arus, tegangan, dan luas area elektroda yang digunakan. Heat flux yang diberikan merupakan panas yang



Proses transfer panas melalui mekanisme konveksi terjadi di seluruh permukaan benda kerja yang mengalami kontak secara langsung dengan udara di lingkungan sekitar. Nilai konveksi dan reference temperatur yang digunakan pada penelitian ini adalah  $15 \text{ W/m}^2\text{K}$  dan  $300 \text{ K}$ . Proses pengelasan meliputi empat layer/permukaan. Geometri las tiap layer ditunjukkan pada gambar 4.1 berikut.



**Gambar 4. 1 Geometri layer pada pengelasan**

Variasi variabel yang dilakukan pada penelitian ini meliputi heat input dan pola pengelasan (*welding sequence*). Heat input yang





## LAPORAN TUGAS AKHIR BAB IV ANALISA DATA & PEMBAHASAN

diberikan bergantung pada besarnya tegangan, arus, dan luasan elektroda serta besarnya temperatur *interpass* yang digunakan. Sedangkan pola pengelasan dilakukan dalam dua macam, yaitu searah (*unidirectional*) dan bolak-balik (*multi-directional*).

**Tabel 4. 1** Kondisi variasi simulasi heat input

Variabel	Temperatur		
	473 K	673 K	873 K
Luas area elektroda (m <sup>2</sup> )	8,29E-6	8,29E-6	8,29E-6
Voltage (V)	10	10	10
Arus (A)	17	13	11
Welding heat flux (J/m <sup>2</sup> )	9.643.635	7.374.544	6.239.998
Energy from interpass temperature (J/m <sup>2</sup> )	1.002.946	2.599.795	3.877.450
Total heat input (J/m <sup>2</sup> )	10.646.581	9.974.339	10.117.448

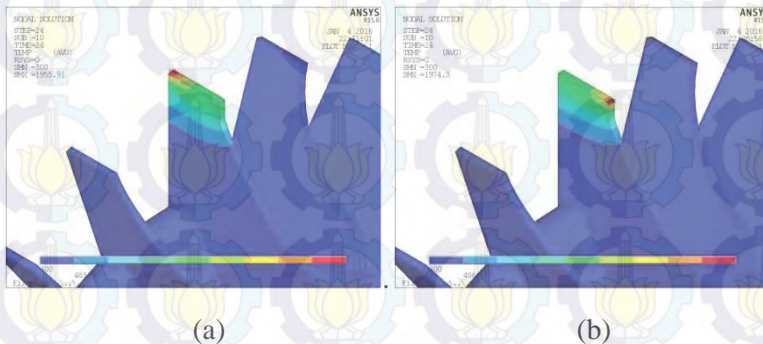
Beban heat input terbesar yang diberikan terjadi pada temperatur interpass 473 K, sedangkan heat input terkecil terjadi pada temperatur interpass sebesar 873 K. Dari tabel 4.1 diatas menandakan bahwa besarnya temperatur interpass dan heat input pengelasan yang diberikan saling berbanding terbalik. Semakin besar temperatur interpass pada pengelasan, maka semakin kecil tenaga yang dibutuhkan untuk melakukan pengelasan begitupula sebaliknya. Sehingga dalam mempertimbangkan efisiensi power selama proses

## LAPORAN TUGAS AKHIR

### BAB IV ANALISA DATA |& PEMBAHASAN



pengelasan dapat mempertimbangkan besar kecilnya arus dan voltage yang dikeluarkan pula.



**Gambar 4. 2** Perbedaan profil distribusi temperatur pengelasan pola bolak-balik dan searah pada detik ke 24. Gambar (a) merupakan pola pengelasan bolak-balik sedangkan gambar (b) menunjukkan pola pengelasan non searah

Pola pengelasan pada penelitian ini dilakukan dengan dua metode, yaitu bolak-balik dan searah. Pada pengelasan dengan pola bolak-balik, setelah selesai pengerjaan las pada salah satu layer, maka pengelasan selanjutnya dilakukan dengan memulai dari elemen yang berada diatas elemen terakhir di layer terakhir. Sehingga pengerjaan las berlangsung dengan dua arah. Sedangkan pada pola pengelasan searah, maka pengerjaan las di layer selanjutnya dimulai dari elemen yang berada di atas elemen pertama pada layer sebelumnya.



## LAPORAN TUGAS AKHIR BAB IV ANALISA DATA & PEMBAHASAN

Pembebanan termal yang diberikan pada material turbin dilakukan secara *transient*. Dengan pembebanan ini, maka output distribusi temperatur yang didapatkan merupakan fungsi dari selang waktu selama proses analisa. Hal ini dilakukan guna mendapatkan hasil yang aktual sesuai dengan eksperimen yang dilakukan pada proses pengelasan

### IV.1.2. Analisa Distribusi Temperatur

Pengaruh heat input dan material properties yang diberikan sebagai bahan analisa distribusi temperatur menghasilkan output temperatur yang terus meningkat pada daerah yang dikenai panas hingga mencapai temperatur puncak. Setelah pengelasan berakhir, maka temperatur pendinginan kamar akan mengembalikan temperatur benda kerja mendekati temperatur kamar.

**Tabel 4. 2** Distribusi temperatur pada daerah weld metal

Waktu	Temp. 473 K	Temp. 473 K	Temp. 673 K	Temp. 673 K	Temp. 873 K	Temp. 873 K
	Bolak-balik	Searah	Bolak-balik	Searah	Bolak-balik	Searah
1	1013	1013	974	974	982	982
2	833	833	804	804	810	810
3	845	845	815	815	822	822
4	852	852	822	822	828	828
5	853	853	823	823	830	830
6	1062	1062	1021	1021	1030	1030
7	1181	1174	1135	1128	1145	1138
8	1098	1019	1056	980	1065	989
9	1059	1038	1019	998	1027	1007



## LAPORAN TUGAS AKHIR

### BAB IV ANALISA DATA |& PEMBAHASAN



10	1048	1049	1008	1009	1017	1018
11	1037	1056	998	1016	1006	1025
12	1232	1258	1183	1208	1194	1219
13	1509	1381	1449	1327	1462	1339
14	1347	1261	1294	1212	1306	1222
15	1312	1276	1260	1227	1271	1237
16	1284	1288	1235	1238	1245	1248
17	1265	1294	1216	1244	1226	1254
18	1449	1487	1392	1429	1405	1441
19	1971	1920	1891	1843	1908	1859
20	1795	1648	1723	1582	1738	1596
21	1697	1662	1629	1595	1643	1609
22	1668	1669	1601	1603	1615	1617
23	1648	1670	1582	1603	1596	1618
24	1956	1974	1877	1891	1894	1912
72	582	580	566	564	569	568

Tabel 4.2 diatas menunjukkan distribusi temperatur daerah weld metal masing-masing variasi. Pada tiap langkah (*load step*) pengelasan terjadi pemanasan pada tiap elemen sesuai dengan letak elektroda busur las pada langkah tersebut. Panas tersebut secara stimultan kemudian ditransfer melalui proses konduksi pada elemen-elemen yang berada di sekitar daerah las dan konveksi pada seluruh elemen benda kerja yang mengalami kontak langsung dengan udara sekitar. Setelah seluruh proses pemanasan selesai, maka tahap pendinginan dilakukan pada temperatur kamar selama 48 sekon di langkah (*load step*) ke 25.





## LAPORAN TUGAS AKHIR BAB IV ANALISA DATA & PEMBAHASAN

---

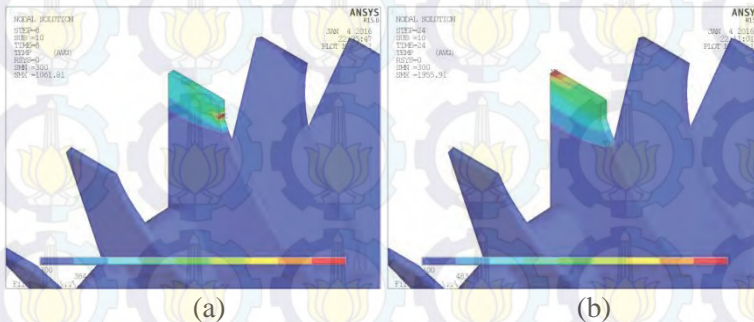
Pada langkah pengerjaan (*load step*) 1 sampai 6, pengelasan yang terjadi berlangsung pada layer 1 di sepanjang daerah lasan. Layer ke 2 meliputi langkah pengerjaan 7 sampai 12, layer ke 3 meliputi langkah pengerjaan 13 sampai 18, dan pengerjaan langkah 19 sampai 24 meliputi pengerjaan las pada layer teratas, layer ke 4. Dari sebaran temperatur weld metal yang ditunjukkan pada tabel 4.2 menunjukkan bahwa temperatur yang terjadi pada layer 1 belum mencapai temperatur melting material Inconel 792 yang digunakan ( $\pm 1500$  K) sebagai benda kerja. Begitupula pada layer ke 2 dan 3. Temperatur melting hanya tercapai pada daerah weld metal di layer ke 4. Hal ini disebabkan oleh teknik pengerjaan simulasi penelitian yang sudah memunculkan seluruh elemen pada daerah lasan (*weld metal*) yang terdiri dari 24 element sejak awal proses pengelasan. Akibatnya, panas yang diberikan pada layer 1 sampai 3 menjadi tidak optimal karena panas yang terjadi tidak terkonveksi secara merata melalui udara/lingkungan melainkan terkonduksi pada elemen-elemen daerah lasan yang berada pada layer-layer di atasnya. Padahal besar transfer panas yang terjadi secara konduksi jauh lebih besar dibandingkan konveksi yang besarnya tidak begitu berpengaruh pada output distribusi temperatur. Sedangkan proses pengelasan pada layer 4 (langkah pengerjaan 19 sampai 24) berlangsung secara optimal karena merupakan layer teratas dari keseluruhan daerah lasan sehingga tidak ada konduksi yang terjadi pada layer di atasnya. Hal tersebut digambarkan melalui sebaran

## LAPORAN TUGAS AKHIR

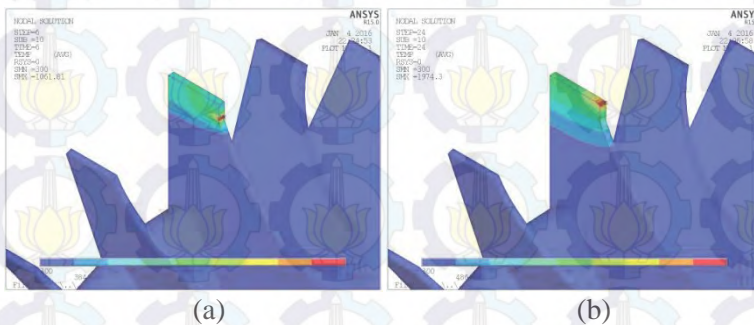
### BAB IV ANALISA DATA |& PEMBAHASAN



temperatur daerah lasan pada layer 4 yang telah mencapai temperatur melting material Inconel 792 pada gambar 4.3 sampai 4.8.



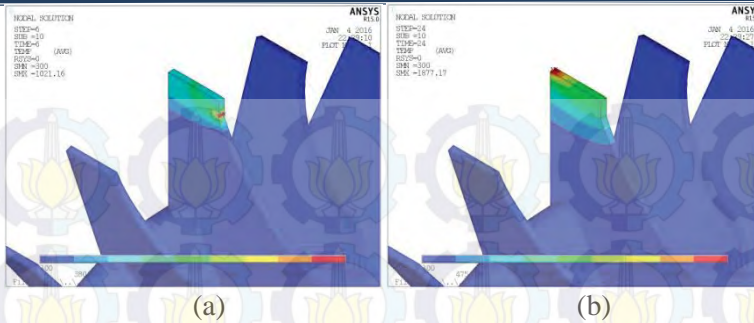
**Gambar 4. 3** Profil distribusi temperatur dengan pola pengelasan bolak-balik dan temperatur interpass 473 K pada (a) detik ke 6 dan (b) detik ke 24



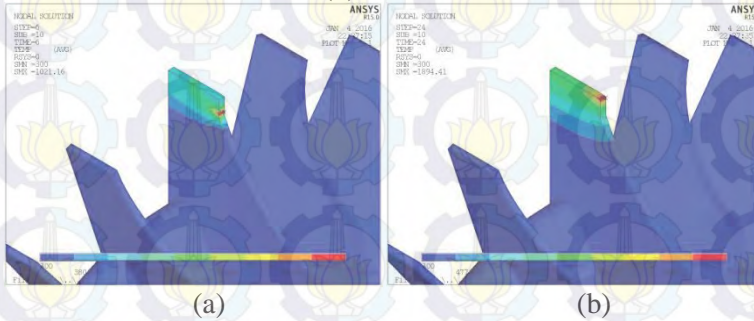
**Gambar 4. 4** Profil distribusi temperatur dengan pola pengelasan searah dan temperatur interpass 473 K pada (a) detik ke 6 dan (b) detik ke 24



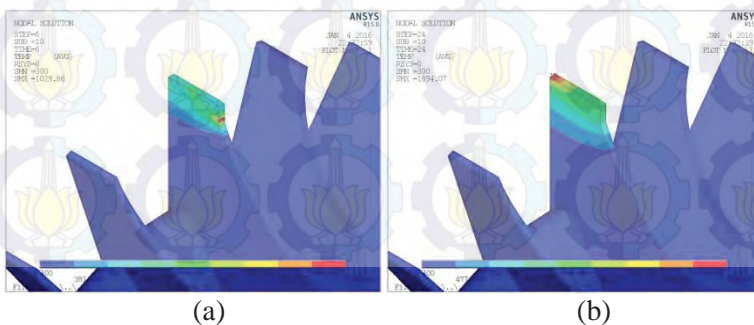
## LAPORAN TUGAS AKHIR BAB IV ANALISA DATA & PEMBAHASAN



**Gambar 4.5** Profil distribusi temperatur dengan pola pengelasan bolak-balik dan temperatur interpass 673 K pada (a) detik ke 6 dan (b) detik ke 24



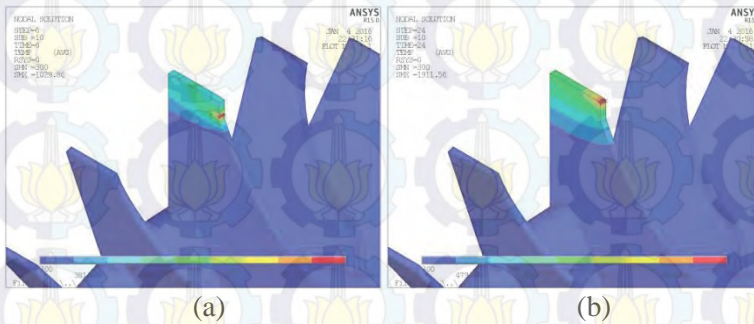
**Gambar 4.6** Profil distribusi temperatur dengan pola pengelasan searah dan temperatur interpass 673 K pada (a) detik ke 6 dan (b) detik ke 24







**Gambar 4. 7** Profil distribusi temperatur dengan pola pengelasan bolak-balik dan temperatur interpass 873 K pada (a) detik ke 6 dan (b) detik ke 24



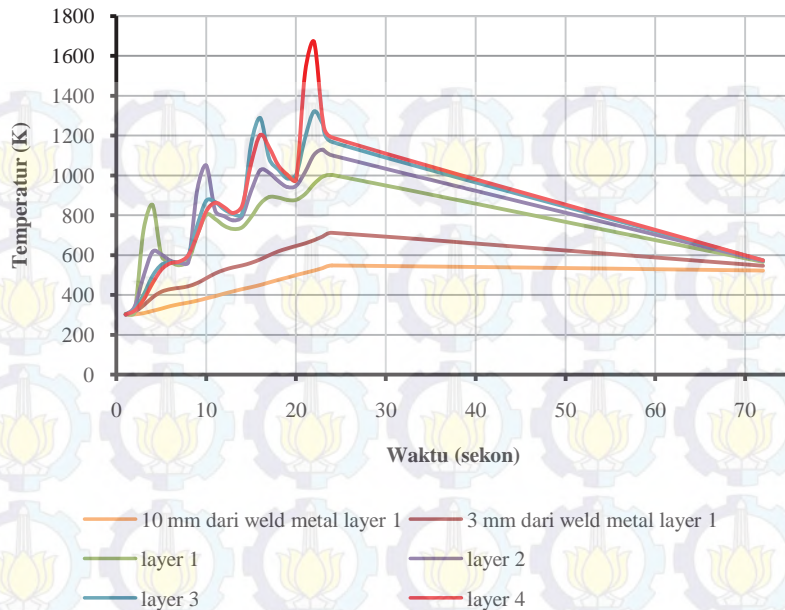
**Gambar 4. 8** Profil distribusi temperatur dengan pola pengelasan searah dan temperatur interpass 873 K pada (a) detik ke 6 dan (b) detik ke 24

Apabila digunakan grafik distribusi temperatur dengan fungsi waktu tertentu, maka didapatkan siklus termal sehingga dapat diketahui kapan tercapainya temperatur puncak pada suatu nodal/titik. Selain itu dapat juga dilakukan interpretasi terhadap laju pendinginan yang terjadi dengan menggunakan pola siklus termal yang dihasilkan.





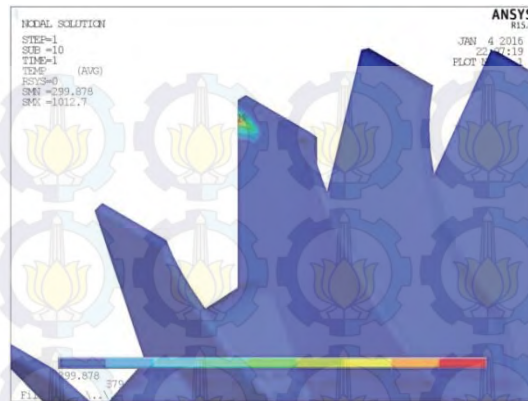
## LAPORAN TUGAS AKHIR BAB IV ANALISA DATA & PEMBAHASAN



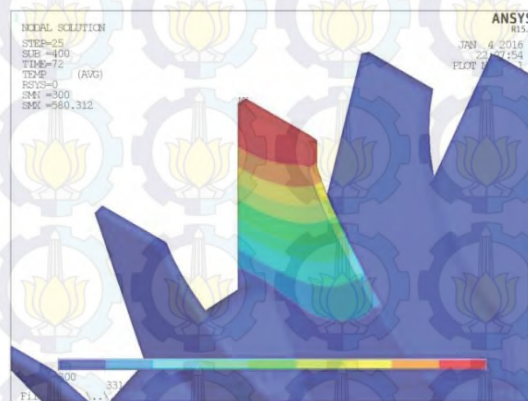
**Gambar 4. 9** Siklus termal pengelasan bolak-balik dengan temperatur interpass 473 K di daerah weld metal dan sekitarnya

Pada gambar 4.9 dapat diketahui bahwa semakin jauh jarak nodal dari sumber panas yang terletak pada daerah lasan, maka temperatur puncaknya pun semakin menurun. Pada daerah weld metal di layer 4 didapatkan nilai temperatur puncak mencapai 1.670 K / 1.397°C. Penurunan temperatur puncak secara kontinyu terlihat pada weld metal layer ke 3, 2, dan 1. Sedangkan pada nodal yang berjarak 3 mm dari daerah lasan layer 1 memiliki temperatur puncak yang lebih rendah dibandingkan layer 1, yaitu 711 K / 438°C. Pada nodal berjarak 10 mm temperatur puncaknya semakin menurun menjadi 548 K / 275°C. Sehingga jarak antara daerah lasan memiliki pengaruh terhadap temperatur puncak yang dicapai.

Untuk menganalisa proses transfer panas yang terjadi pada pengelasan dapat ditinjau melalui profil temperatur yang terbentuk pada geometri pemodelan.



**Gambar 4. 10** Distribusi temperatur pada saat pemanasan layer 1 pada detik ke 1 dengan arah pengelasan pada sumbu x



**Gambar 4. 11** Distribusi temperatur pada saat pendinginan temperatur kamar setelah 48 detik

Gambar 4.10 dan 4.11 menunjukkan profil temperatur pada kondisi awal ( $t = 1$ ) dan akhir ( $t = 72$ ) pengelasan. Dari kedua gambar tersebut dapat diketahui bahwa panas dari proses pengelasan terdistribusi pada sebagian besar daerah sudu/blade turbin setelah proses pemanasan berakhir. Hal ini disebabkan karena transfer panas



## LAPORAN TUGAS AKHIR

### BAB IV ANALISA DATA & PEMBAHASAN

secara konduksi yang terjadi pada daerah lasan memerlukan selang waktu tertentu untuk dapat mempengaruhi panas di daerah sekitarnya.

Distribusi temperatur pada setiap titik mewakili daerah weld metal, *heat affected zone* (HAZ), dan base metal yang berbeda-beda. Pada tabel 4.3 dapat diketahui bahwa temperatur tertinggi (*peak temperature*) pengelasan pada masing-masing variasi adalah sebagai berikut.

**Tabel 4. 3** Temperatur tertinggi masing-masing variasi pengelasan

Kondisi pengelasan	Waktu (sekon)	Temperatur puncak (K)
Temperatur interpass 473 K bolak-balik	24	1971
Temperatur interpass 473 K searah	19	1974
Temperatur interpass 673 K bolak-balik	24	1891
Temperatur interpass 673 K searah	19	1891
Temperatur interpass 873 K bolak-balik	24	1908
Temperatur interpass 873 K searah	19	1912

Perbandingan besarnya temperatur puncak pada masing-masing kondisi pengelasan berbanding lurus dengan besarnya heat input yang diberikan pada proses pengelasan. Semakin besar heat input yang diberikan maka temperatur puncaknya menjadi semakin tinggi, begitupula sebaliknya.

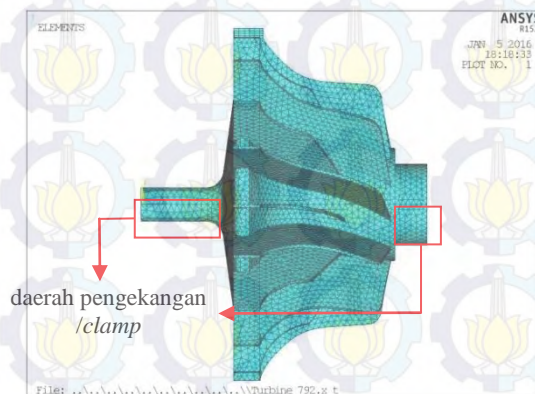




## IV.2. Simulasi Pembebanan Struktur

### IV.2.1 Simulasi Pembebanan Struktur

Setelah didapatkan hasil analisa termal, kemudian dilakukan pembebanan struktur pada material turbin guna mendapatkan tegangan sisa dan distorsi yang timbul dari proses pengelasan. Input yang diberikan pada analisa struktur ini berupa output analisa termal dan *displacement* pada permukaan benda kerja. Pemberian beban displacement ke sumbu x, y, dan z diberikan guna mengekang posisi benda kerja selama proses pengelasan berlangsung. Pada penelitian ini pengekangan dilakukan pada permukaan bawah poros turbin sebagaimana digambarkan pada gambar 4.12 berikut.



**Gambar 4. 12** Posisi pengekangan/*clamp* pada analisa struktur

Proses pemanasan dan pendinginan yang berlangsung selama proses pengelasan benda kerja menyebabkan munculnya tegangan kompresi dan tarik secara simultan. Pemanasan yang dilakukan menggunakan 24 langkah pengerjaan dan membutuhkan waktu 24



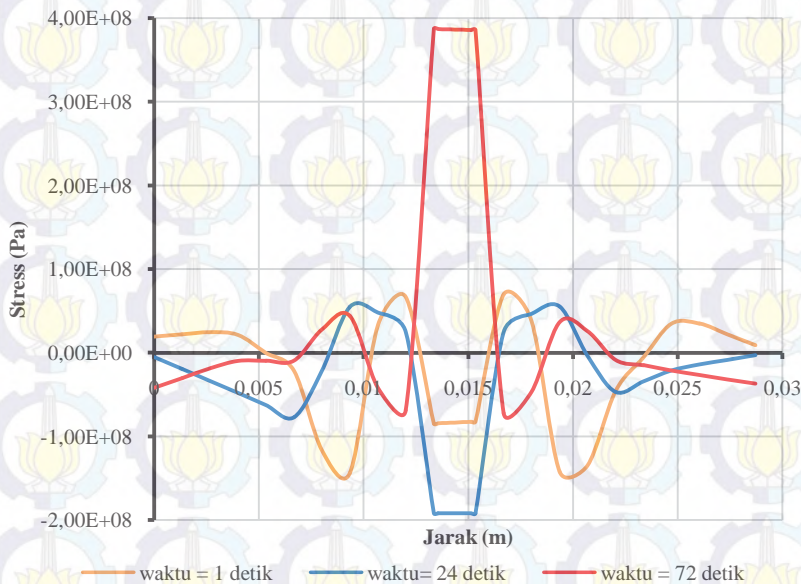


## LAPORAN TUGAS AKHIR BAB IV ANALISA DATA & PEMBAHASAN

detik, sedangkan pendinginan menggunakan 1 langkah pengerjaan dengan 48 detik proses pengerjaan.

### IV.2.1 Analisa Pembebanan Struktur

Ilustrasi gambar 4.13 di bawah menunjukkan perkembangan tegangan yang terjadi pada salah satu metode pengelasan yang dilakukan.



**Gambar 4. 13** Grafik tegangan arah sumbu x pada pengelasan bolak balik dengan temperatur interpass 473 K

Pada saat mengalami gradient termal selama pengelasan terjadi beberapa pola tegangan yang kompleks pada benda kerja.

## LAPORAN TUGAS AKHIR

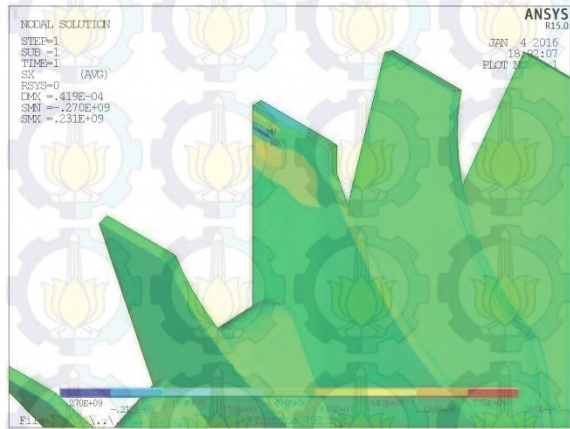
### BAB IV ANALISA DATA |& PEMBAHASAN



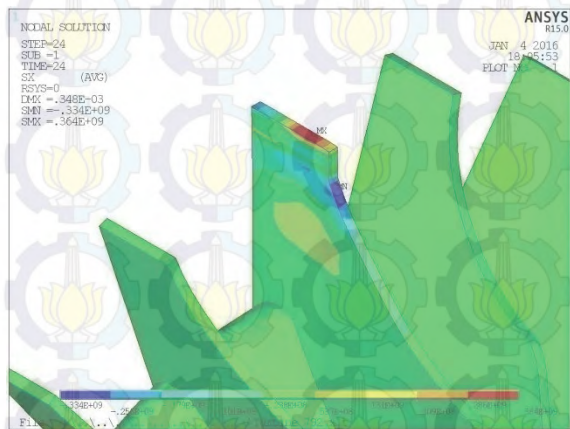
Diawal proses pengerjaan, pola perkembangan tegangan digambarkan sesuai dengan grafik garis berwarna hijau. Pemanasan pada awal proses pengelasan yang berada di sekitar *nodal reference* membuat tegangan yang terbentuk bernilai negatif (tegangan kompresi). Tegangan ini terus berlangsung hingga mencapai daerah lasan. Partikel – partikel atom yang terdapat pada daerah lasan saling bertumbukan akibat energi yang diterima berupa panas di sekitar daerah lasan sehingga menimbulkan tegangan. Grafik di akhir pengelasan ( $t = 24$  sekon) mengalami perkembangan tegangan yang identik dengan pola yang terjadi di awal pengelasan. Hal ini disebabkan oleh temperatur daerah lasan yang lebih tinggi dibandingkan pada waktu awal pengelasan. Grafik yang dimunculkan pada akhir proses pendinginan ( $t = 72$  sekon) digambarkan melalui garis merah pada gambar. Grafik yang muncul adalah berkebalikan dengan kedua grafik yang ada sebelumnya. Hal ini terjadi karena selama berlangsungnya proses pendinginan, daerah lasan cenderung menjadi lebih cepat dingin ketimbang daerah lainnya karena mengalami proses transfer panas secara konduksi ke elemen-elemen yang berada di bawahnya.



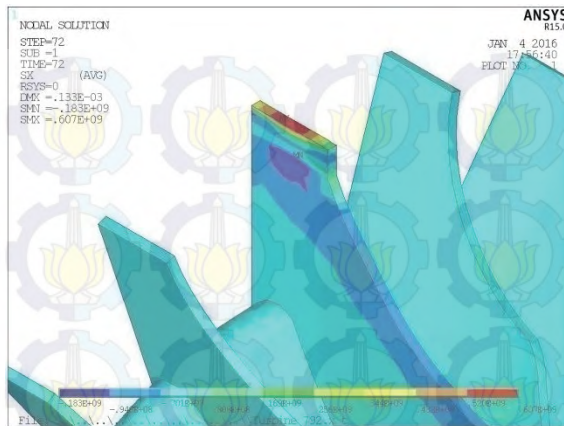
## LAPORAN TUGAS AKHIR BAB IV ANALISA DATA & PEMBAHASAN



(a)

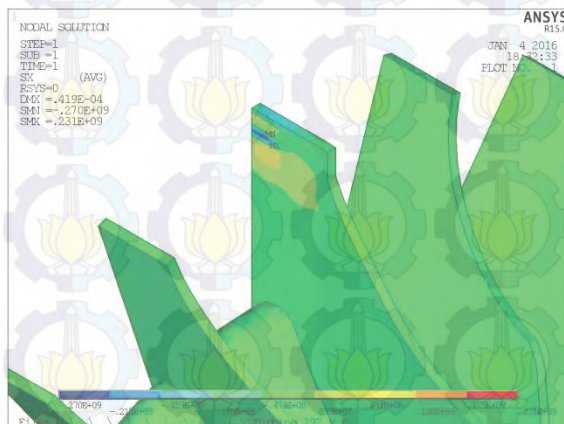


(b)



(c)

**Gambar 4. 14** Distribusi tegangan ( $\sigma_x$ ) pada pengelasan bolak-balik dengan temperatur interpass 473 K di (a)  $t = 1$  detik, (b)  $t = 24$  detik, dan (c)  $t = 72$  detik

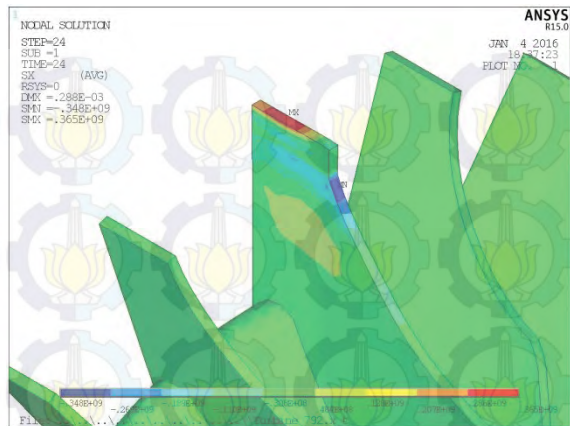


(a)

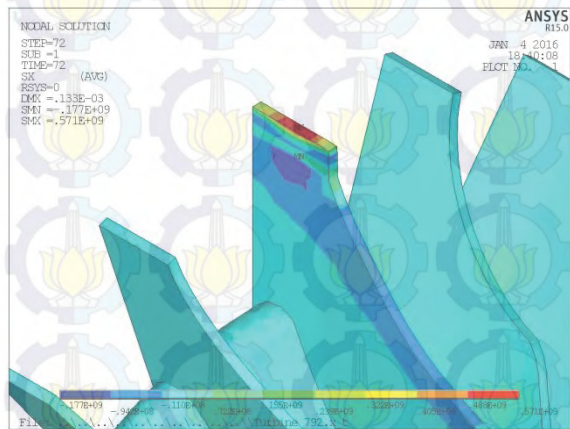




## LAPORAN TUGAS AKHIR BAB IV ANALISA DATA & PEMBAHASAN



(b)



(c)

**Gambar 4. 15** Distribusi tegangan ( $\sigma_x$ ) pada pengelasan searah dengan temperatur interpass 473 K di (a)  $t = 1$  detik, (b)  $t = 24$  detik, dan (c)  $t = 72$  detik



Ilustrasi distribusi tegangan pada pengelasan dapat dilihat pada gambar 4.14 dan 4.15. Gambar 4.14 merupakan ilustrasi simulasi pengelasan yang dilakukan secara bolak-balik dengan menggunakan temperatur interpass 473 K, sedangkan gambar 4.15 adalah pengelasan searah pada temperatur interpass yang sama. Daerah berwarna hijau kekuningan dan merah pada gambar menunjukkan tegangan tarik (*tensile stress*) yang bernilai positif sedangkan daerah berwarna biru menandakan tegangan kompresi (*compressive stress*). Tegangan yang ditunjukkan pada gambar adalah tegangan searah sumbu x karena tegangan tersebutlah yang memiliki pengaruh terbesar pada benda kerja.

Gambar 4.14 menunjukkan distribusi tegangan pada benda kerja dengan pengelasan bolak-balik. Tahapan yang pertama berada pada awal pengelasan di detik ke 1. Tahapan kedua merupakan kontur tegangan pada saat akhir pengelasan pada detik ke 24. Dan tahapan terakhir adalah saat proses pengelasan berakhir dan pendinginan telah berlangsung selama 48 detik. Pada ilustrasi terlihat bahwa ketika proses pemanasan dimulai (waktu pengelasan memasuki detik pertama) tegangan kompresi terjadi secara luas pada daerah sekitar lasan (ditandai dengan warna hijau pada gambar). Tegangan kompresi tertinggi terjadi pada akhir proses pemanasan yang memiliki nilai sebesar 334 MPa. Hal ini diakibatkan oleh tingginya *thermal stress* (tegangan yang dihasilkan sebagai efek dari panas) pada daerah tersebut. Sedangkan tegangan tarik terbesar terjadi pada akhir proses pendinginan senilai 607 MPa. Hal ini



## LAPORAN TUGAS AKHIR BAB IV ANALISA DATA & PEMBAHASAN

diakibatkan oleh tingginya temperatur sehingga dapat menyebabkan terjadinya proses ekspansi termal.

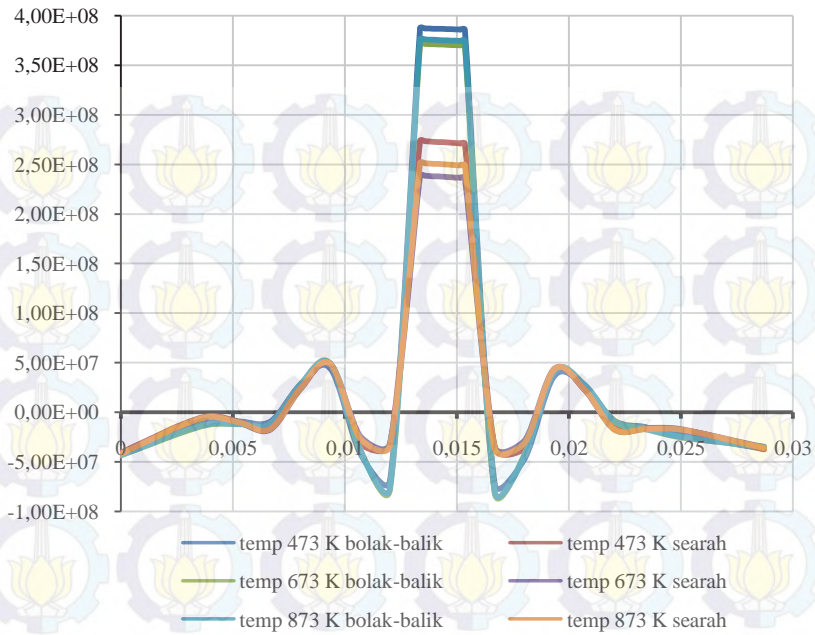
Pada gambar 4.15, proses pemanasan berlangsung secara satu arah dengan temperatur interpass 473 K. Tahapan-tahapan yang dilalui sama dengan gambar gambar 4.13, namun pada detik ke 24. Hal ini didapati karena selama proses pemanasan, pola yang dibentuk oleh pengelasan secara satu arah pun berbeda. Tegangan kompresi tertinggi terjadi pada akhir proses pemanasan yang memiliki nilai sebesar 348 MPa. Sedangkan tegangan tarik terbesar terjadi pada akhir proses pendinginan senilai 571 MPa.

Jika dibandingkan, gambar 4.14 dan 4.15 terlihat identik karena keduanya menggunakan heat input yang sama besar, yaitu  $10.646.581 \text{ J/m}^2$ . Perbedaan yang nampak pada gambar ditunjukkan pada besarnya tegangan tarik dan geser yang dihasilkan oleh kedua metode pengelasan tersebut. Dari hasil yang didapatkan, pengelasan dengan pola pengelasan bolak – balik memiliki besar tegangan searah sumbu x yang lebih besar dibandingkan dengan pola pengelasan pengelasan satu arah.



# LAPORAN TUGAS AKHIR

## BAB IV ANALISA DATA |& PEMBAHASAN



**Gambar 4. 16** Grafik tegangan sisa pada pengelasan sudu turbin Inconel 792

**Tabel 4. 4** Tegangan sisa tarik dan kompresi maksimum pada pengelasan sudu turbin Inconel 792

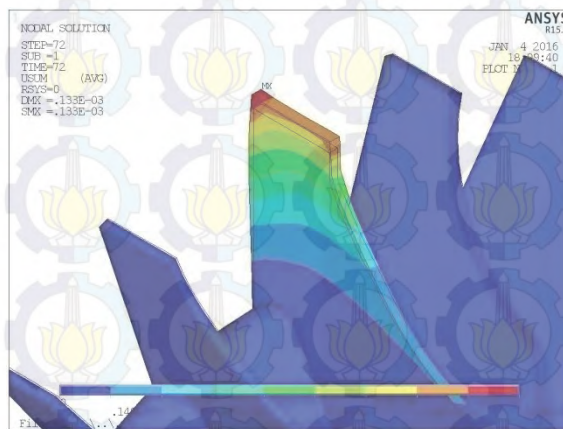
Jenis Tegangan	473 K	473 K	673 K	673 K	873 K	873 K
	Bolak-balik (Pa)	Searah (Pa)	Bolak-balik (Pa)	Searah (Pa)	Bolak-balik (Pa)	Searah (Pa)
Tegangan tarik	$607 \times 10^6$	$571 \times 10^6$	$529 \times 10^6$	$517 \times 10^6$	$546 \times 10^6$	$529 \times 10^6$
Tegangan tekan	$-183 \times 10^6$	$-177 \times 10^6$	$-169 \times 10^6$	$-165 \times 10^6$	$-172 \times 10^6$	$-167 \times 10^6$



## LAPORAN TUGAS AKHIR BAB IV ANALISA DATA & PEMBAHASAN

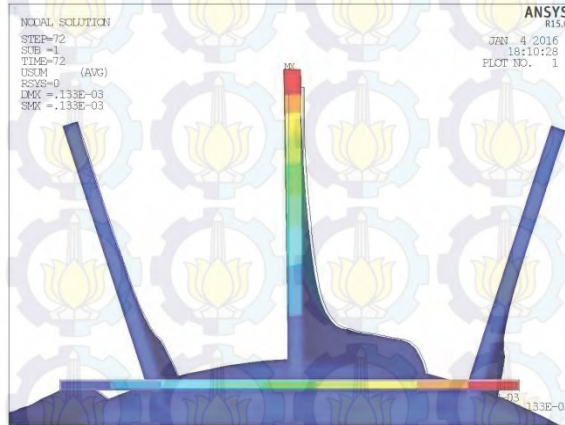
Tabel 4.4 diatas menggambarkan besar tegangan sisa yang dihasilkan dari simulasi pengelasan. Pengelasan dengan pola bolak – balik menghasilkan besar tegangan sisa yang lebih besar dibandingkan pola pengelasan searah pada temperatur interpass yang sama. Sedangkan perbandingan heat input menunjukkan bahwa semakin tinggi heat input yang diberikan maka tegangan sisa yang ditimbulkan menjadi semakin kecil.

Dari analisa tegangan sisa yang tertinggal selama proses pengelasan (pemanasan dan pendinginan) maka dapat ditentukan besar distorsi yang terjadi. Hal ini dikarenakan dari tegangan yang tertinggal setelah proses pengelasan berlangsung mengakibatkan terjadinya distorsi pada benda kerja.



**Gambar 4. 17** Distorsi yang terjadi di daerah sudu turbin (tampak isometric) pada pengelasan bolak-balik dengan temperatur interpass

473 K



**Gambar 4. 18** Distorsi yang terjadi di daerah sudu turbin (tampak belakang) pada pengelasan bolak-balik dengan temperatur interpass 473 K

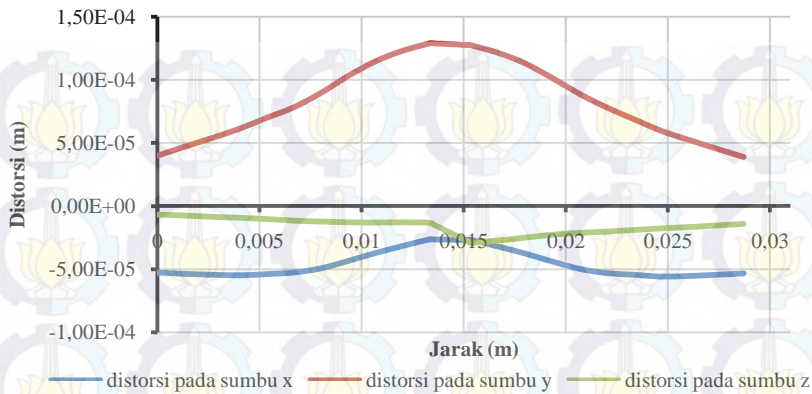
Distorsi paling tinggi yang terjadi di daerah sudu turbin adalah sebesar 0,133 mm. Pada gambar 4.17 dan 4.18 tampak arah distorsi yang terjadi pada sudu merupakan perbesaran skala hasil yang dilakukan 20x guna menggambarkan secara lebih jelas.

Dari grafik yang ditunjukkan oleh gambar 4.19 dibawah, maka dapat diketahui bahwa distorsi terbesar terdapat pada arah sumbu y. Hal tersebut terlihat pada gambar sebelumnya (gambar 4.17 dan 4.18) yang menunjukkan arah distorsi lebih besar keatas (sumbu y). Sedangkan distorsi terkecil dihasilkan pada arah sumbu z.



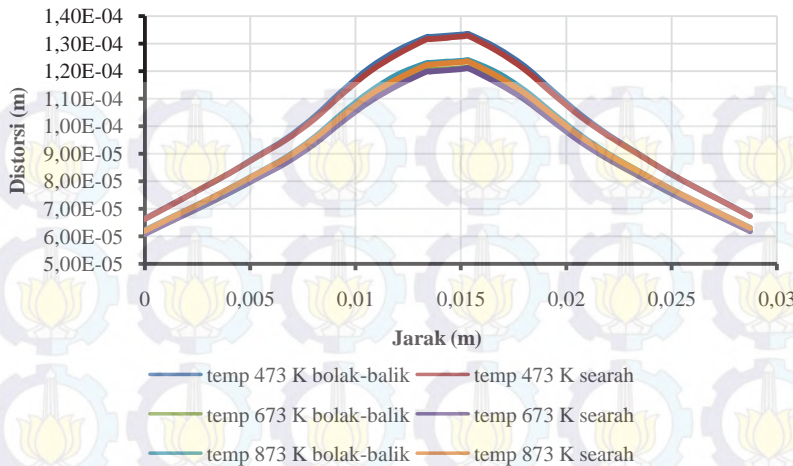


## LAPORAN TUGAS AKHIR BAB IV ANALISA DATA & PEMBAHASAN



**Gambar 4. 19** Grafik nilai distorsi pada pengelasan bolak-balik dengan temperatur interpass 473 K

Grafik pada gambar 4.20 menunjukkan pola distorsi yang terjadi mulai dari daerah base metal hingga *weld metal*. Daerah dengan distorsi terbesar dihasilkan pada daerah di sekitaran *weld metal*. Hal ini disebabkan oleh tingginya termal gradient yang dihasilkan pada daerah tersebut selama berlangsungnya proses pemanasan dan pendinginan.



**Gambar 4. 20** Grafik distorsi pada pengelasan sudu turbin Inconel 792

Pada penelitian ini, distorsi total yang dihasilkan pada tiap variasi pengelasan berkisar antara 0 – 0,133 mm. Distorsi terbesar terjadi pada pengelasan bolak – balik dengan temperatur interpass 473 K.

**Tabel 4. 5** Distorsi total terbesar pada pengelasan sudu turbin Inconel 792

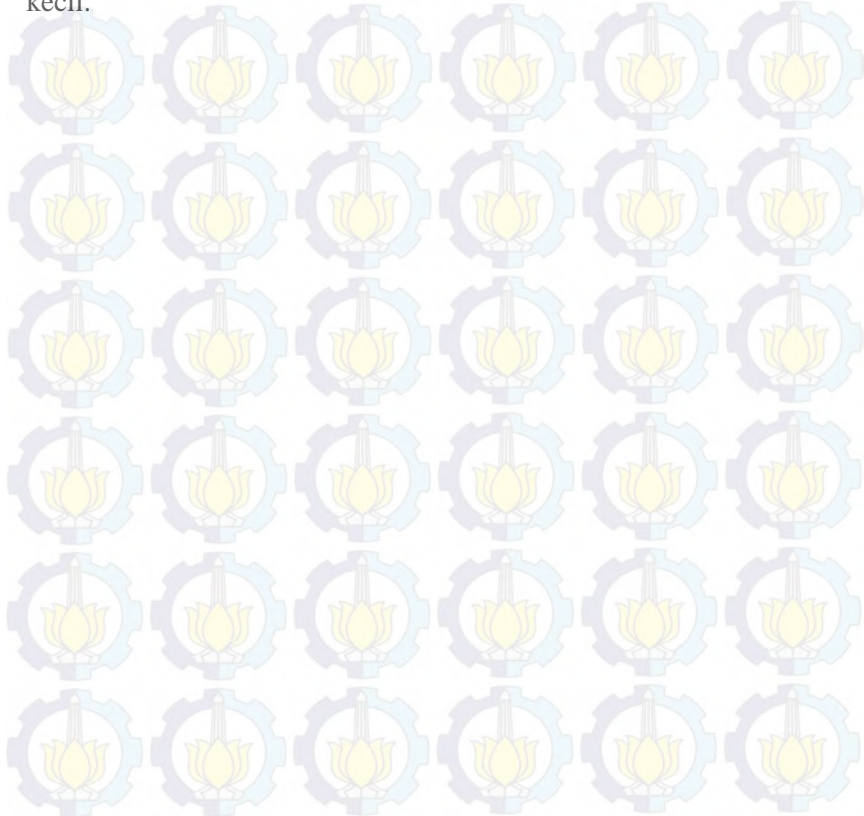
473 K Bolak-balik	473 K Searah	673 K Bolak-balik	673 K Searah	873 K Bolak-balik	873 K Searah
0,133 mm	0,133 mm	0,121 mm	0,121 mm	0,124 mm	0,124 mm

Tabel 4.5 diatas menggambarkan distorsi terbesar yang dihasilkan dari seluruh variasi simulasi pengelasan. Pola pengelasan



## LAPORAN TUGAS AKHIR BAB IV ANALISA DATA & PEMBAHASAN

(*welding sequence*) yang divariasikan pada penelitian ini menghasilkan nilai distorsi maksimum yang besarnya sama. Sehingga pola pengelasan yang dilakukan tidak memberikan pengaruh pada distorsi maksimum yang dihasilkan. Sedangkan perbandingan input heat input pada masing – masing variasi pengelasan menunjukkan bahwa semakin tinggi heat input yang diberikan maka tegangan sisa yang ditimbulkan menjadi semakin kecil.





## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan simulasi pengelasan yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Temperatur pengelasan tertinggi yang didapatkan pada pengerjaan simulasi adalah sebesar 1.974 K. Hasil tersebut didapatkan pada pola pengelasan searah yang diberikan heat input sebesar 10.646.581 J/m<sup>2</sup>. Semakin besar heat input yang diberikan maka temperatur yang dihasilkan semakin tinggi pula.
2. Tegangan sisa terendah yang didapatkan adalah 517 MPa untuk tegangan tarik (*tensile strength*) dan -165 MPa untuk tegangan kompresi (*compressive stress*). Hasil tersebut diperoleh pada pengelasan dengan pola searah dan heat input terkecil, 9.974.339 J/m<sup>2</sup>.
3. Distorsi terkecil yang diperoleh adalah 0,133 mm pada pengelasan dengan pola searah dan heat input terkecil.

#### **5.2 Saran**

Beberapa hal yang perlu dilakukan untuk meningkatkan ketelitian dan akurasi simulasi pengelasan untuk penelitian kedepan adalah sebagai berikut:



## LAPORAN TUGAS AKHIR BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

---

1. Meminimalisir terjadinya tegangan sisa dengan memberikan perlakuan heat treatment setelah proses pengelasan pada temperatur anil Inconel 792.
2. Besarnya distorsi yang terjadi dapat dikurangi dengan memvariasikan pengekanan/*clamp* yang diberikan pada benda kerja.
3. Teknik pengerjaan simulasi dilakukan dengan menggunakan *birth and dead element*, sehingga panas yang terjadi pada layer awal pengelasan (1 sampai 3) tidak mengalami konduksi ke arah elemen-elemen yang berada di atasnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- American Welding Society. (2004). *Welding handbook: welding processes Part 1*. USA.
- ASM Handbook Committee. (2002). *ASM Handbook Vol: 1, Properties and Selections - Irons Steels and High and Performance*, ASM International. USA.
- Danis Y., dkk. (2010). *Numerical Modeling of Inconel 728LC Deposition Welding: Prediction of Residual Stress Induced Cracking*. Journals of Materials Processing Tech. 2053-2061.
- Deng D., (2009). *FEM Prediction of Welding Residual Stress and Distortion in Carbon Steel Considering Phase Transformation Effects*. Materials Design 30. 359-366.
- Everett M., (1987). *Process For Welding Nickel-based Superalloys*. United States Patent Number 4,804,815, NJ. USA.
- Gannon L., dkk. (2010). *Effect of Welding Sequence on Residual Stress and Distortion in flat-bar Stiffened Plates*. Material Structure 23, 2135-2235.
- G.I. Mahiskar, dkk. (2014). *Thermo-mechanical Analysis of Multi-pass-bead-on-plate Welding*. Procedia Materials Science 2522-2531.
- International Welding Engineer. (2011). *The Welding Engineer's Current Knowledge*. SLV Duisburg, Germany.
- Kreith F.
- Masubuchi. (1980). *Analysis of Welded Structures*. Pergamon International Library: International Series on Materials Science and Technology Vol.33.
- Miller Electric Mfg. Co. (2006). *Guidelines for Gas Tungsten Arc-Welding (GTAW)*. USA.
- Mert T., dkk. (2011). *Strain-based Assessment and Modeling for Low Distortion Welding Procedure*. Materials Manufacture Process 27 943-948.
- Mokadem S., (2009). *Preheating Temperature During Welding*. Patent Application Number: 20090134133.



- Peric M., dkk. (2013). *Numerical analysis and experimental investigation of welding residual stresses and distortions in a T-joint fillet weld..* Pp. 1052-1063.
- Pilipenko A. (2001). *Computer Simulation of Residual Stress and Distortion of Thick Plates in Multi-Electrode Submerged Arc Welding, Their Mitigation Techniques.* Norwegian University of Science and Technology. Norway.
- Rahmat A., Pintowantoro S. (2007). *Analisa Distribusi Temperatur dan Tegangan Sisa pada Pengelasan ASTM A131 dengan Metode FE.* ITS Surabaya.
- Schenk T. (2009). *Influence of Clamping Support Distance on Distortion of Welded of Welded T-Joints.* Science Technology Welding Joint 14 369-375.
- Sugiharto A., dkk. (2012). *Advantage of SWET Technique on Joining Inconel 792 Material.* Global Journal of Researches in Engineering Mechanical and Mechanics Engineering Vol. 12 Issue 6 ISSN 0975-5861.
- Suharno, dkk. (2013). *Analisis Kegagalan Retak dan Teknologi Perbaikan Sudu Turbin Jenis Inconel 792 pada Pesawat Terbang.* Jurnal Teknik Mesin PETRA, Vol. 14 No. 1 April 2013. ISSN 1410-9867.
- Syahroni N., Hidayat M. I. P. (2011). *Numerical Simulation of Welding Sequemce Effect on Temperature Distribution, Residual Stresses, and Distortions of T-Joint Fillet Welds.* Advanced Materials Research Vols. 264-265 pp 254-259.
- Syahroni N., Hidayat M. I. P. (2012). *3D Finite Element Simulation of T-Joint Fillet Weld: Effect of Various Welding Sequences on the Residual Stresses and Distortions.*

## LAMPIRAN

### PERHITUNGAN HEAT INPUT PENGELASAN

- **Heat input pengelasan dengan temperatur pre heat 473 K**

Heat input pengelasan

$$q_{\phi} = \frac{H_{net}}{A_{\phi}} = \frac{0,6 \times 10 \times 17}{3,14 \times 1,625 \times 1,625 \times 10^{-6}}$$

$$= 12,30166208 \cdot 10^6 \text{ J/m}^2$$

$$q_{el} = q_{\phi} \times \frac{A_{el}}{A_{\phi}} = 9.643.635 \text{ J/m}^2$$

Heat input pre heat

$$Q = m \int_{300}^{473} cp \, dT$$

$$= 80,437 \text{E-}6 \int_{300}^{473} -0,001T^2 + 0,714T + 402,8 \, dT$$

$$= 1.002.946 \text{ J/m}^2$$

Heat input total

$$\text{Heat input pengelasan} + \text{heat input pre heat} = 6.239.998 + 1.002.946 = 10.646.581 \text{ J/m}^2$$

- **Heat input pengelasan dengan temperatur pre heat 673 K**

Heat input pengelasan

$$q_{\phi} = \frac{H_{net}}{A_{\phi}} = \frac{0,6 \times 10 \times 13}{3,14 \times 1,625 \times 1,625 \times 10^{-6}}$$

$$= 9,407153 \cdot 10^6 \text{ J/m}^2$$

$$q_{el} = q_{\phi} \times \frac{A_{el}}{A_{\phi}} = 7.374.544 \text{ J/m}^2$$

Heat input pre heat

$$Q = m \int_{300}^{673} cp \, dT$$

$$= 80,437 \text{E-}6 \int_{300}^{673} -0,001x^2 + 0,761x + 401,9 \, dT$$

$$= 2.599.795 \text{ J/m}^2$$

Heat input total

$$\text{Heat input pengelasan} + \text{heat input pre heat} = 7.374.544 + 2.599.795 = 9.974.339 \text{ J/m}^2$$

- **Heat input pengelasan dengan temperatur pre heat 873 K**

Heat input pengelasan

$$q_{\phi} = \frac{H_{net}}{A_{\phi}} = \frac{0,6 \times 10 \times 11}{3,14 \times 1,625 \times 1,625 \times 10^{-6}} \\ = 7,959898.10^6 \text{ J/m}^2$$

$$q_{el} = q_{\phi} \times \frac{A_{el}}{A_{\phi}} = 6.239.998 \text{ J/m}^2$$

Heat input pre heat

$$Q = m \int_{300}^{873} cp dT \\ = 80,437 \text{ E-6} \int_{300}^{473} 1 \text{ E} - 06 x^3 - 0,001 x^2 + 0,674 x + 404,5 dT \\ = 3.877.450 \text{ J/m}^2$$

Heat input total

$$\text{Heat input pengelasan} + \text{heat input pre heat} = 6.239.998 + 3.877.450 = 10.117.448 \text{ J/m}^2$$



**TABEL DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA LAYER/LAPISAN WELD METAL**

Waktu	473 K bolak-balik				473 K searah				673 K bolak-balik			
	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4
1	305	300	302	303	305	300	302	303	304	300	302	302
2	311	340	327	321	311	340	327	321	310	338	325	320
3	725	494	400	375	725	494	400	375	701	482	394	371
4	852	616	494	457	852	616	494	457	822	597	483	448
5	596	602	552	527	596	602	552	527	579	585	537	514
6	566	571	565	559	566	571	565	559	551	556	549	543
7	549	563	564	566	549	563	564	567	535	547	549	551
8	570	564	599	599	571	565	600	600	555	549	582	581
9	699	928	748	700	701	928	749	701	676	893	722	677
10	801	1048	871	817	802	1049	873	819	772	1008	839	788
11	778	820	863	860	781	823	866	863	752	791	832	828
12	742	792	824	837	746	796	829	841	717	764	795	807
13	727	770	801	806	731	775	806	811	702	744	773	778
14	735	790	802	843	740	795	807	848	710	762	774	813
15	786	917	1152	1053	790	921	1155	1057	758	883	1107	1013
16	854	1023	1284	1199	857	1026	1288	1203	823	984	1234	1154





Waktu	673 K searah				873 K bolak-balik				873 K searah			
	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4
1	304	300	302	302	305	300	302	303	305	300	302	303
2	310	338	325	320	311	338	326	320	311	338	326	320
3	701	482	394	371	706	485	395	372	706	485	395	372
4	822	597	483	448	828	601	485	450	828	601	485	450
5	579	585	537	514	583	589	540	517	583	589	540	517
6	551	556	549	543	554	559	553	547	554	559	553	547
7	534	548	549	551	538	551	552	554	538	551	552	554
8	556	549	583	582	558	552	586	585	559	552	587	586
9	677	894	723	678	681	901	727	682	682	901	728	683
10	774	1009	841	789	778	1017	846	794	780	1018	848	796
11	754	794	834	831	757	797	838	835	760	801	841	838
12	721	768	799	811	722	770	801	813	727	774	805	818
13	707	748	778	783	708	749	779	784	712	754	784	789
14	715	767	778	817	715	768	780	819	720	773	785	824
15	762	887	1111	1017	764	890	1117	1022	768	894	1120	1025
16	826	988	1237	1157	830	993	1245	1164	833	996	1248	1167
17	859	974	1042	1095	863	980	1048	1103	866	983	1051	1105



18	856	935	991	1011	861	941	997	1018	863	943	1000	1020
19	845	907	948	967	850	913	954	972	852	915	956	975
20	846	913	967	942	850	918	972	949	853	921	975	950
21	874	980	1144	1459	878	985	1151	1471	881	988	1154	1472
22	922	1062	1269	1603	927	1069	1278	1615	929	1071	1280	1617
23	958	1086	1206	1221	963	1092	1215	1228	966	1096	1217	1232
24	965	1058	1122	1145	969	1063	1128	1151	973	1067	1132	1155
72	551	555	558	559	555	559	562	563	554	559	561	562

**TABEL DISTRIBUSI TEGANGAN PADA WAKTU KE 1, 24, DAN 72**

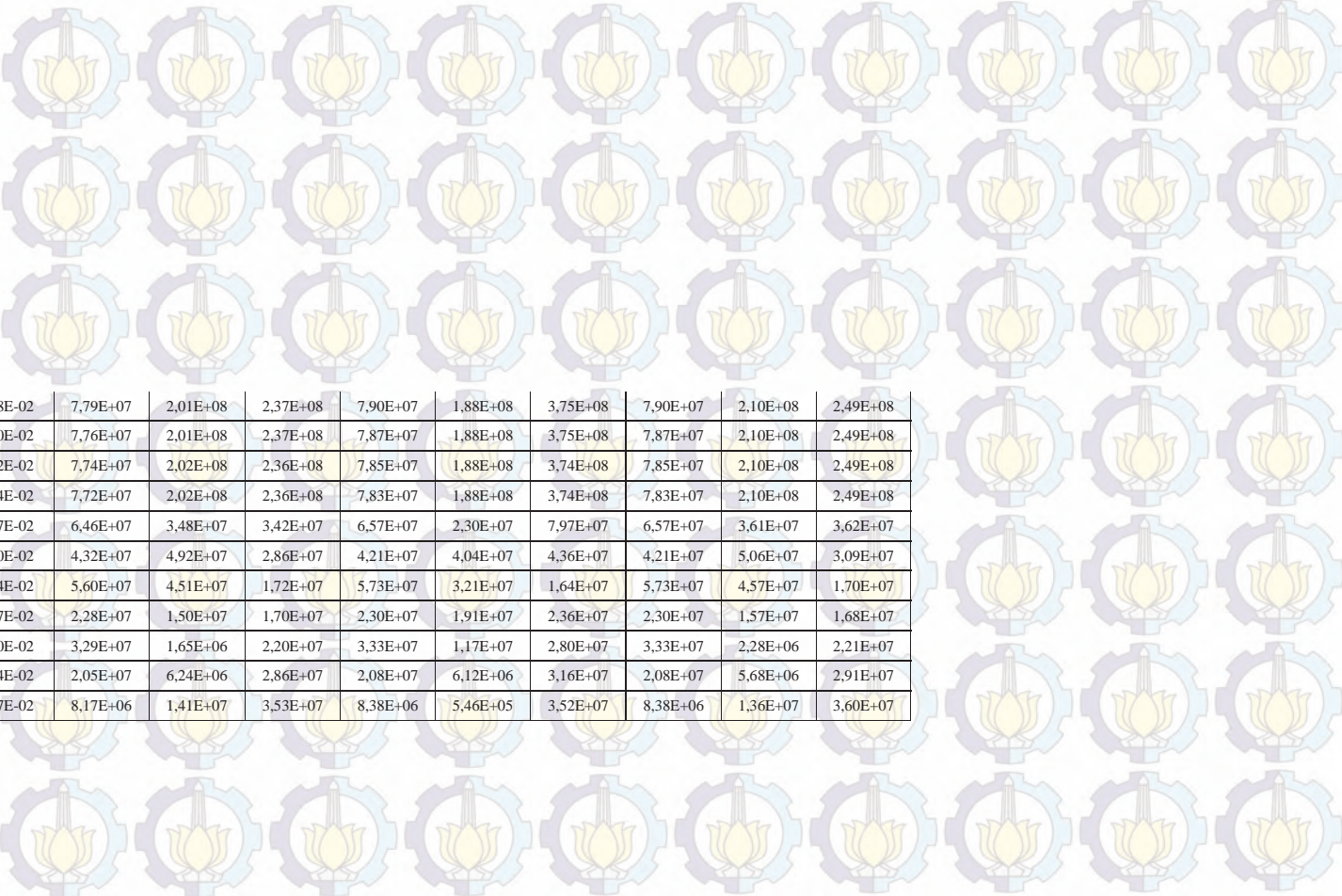
Jarak	473 K bolak-balik			473 K searah			673 K bolak-balik		
	t = 1	t = 24	t = 72	t = 1	t = 24	t = 72	t = 1	t = 24	t = 72
0	1,92E+07	5,14E+06	4,19E+07	1,92E+07	9,14E+06	4,08E+07	1,76E+07	2,09E+06	4,37E+07
1,34E-03	2,19E+07	1,94E+07	3,02E+07	2,19E+07	7,99E+06	2,68E+07	2,02E+07	1,63E+07	3,23E+07
2,67E-03	2,46E+07	3,37E+07	1,85E+07	2,46E+07	2,51E+07	1,29E+07	2,29E+07	3,05E+07	2,09E+07
4,01E-03	2,13E+07	4,80E+07	9,65E+06	2,13E+07	4,48E+07	3,83E+06	1,42E+07	4,48E+07	1,24E+07
8,01E-03	1,16E+08	2,16E+07	2,76E+07	1,16E+08	5,19E+07	2,55E+07	1,53E+08	2,04E+07	2,80E+07
9,35E-03	1,44E+08	5,47E+07	4,41E+07	1,44E+08	1,44E+06	4,79E+07	1,44E+08	5,13E+07	4,96E+07
1,07E-02	3,27E+07	4,80E+07	4,18E+07	3,27E+07	5,43E+07	3,18E+07	3,80E+07	4,09E+07	3,74E+07
1,20E-02	6,67E+07	2,52E+07	6,87E+07	6,67E+07	3,59E+07	3,21E+07	6,16E+07	2,23E+07	7,77E+07
1,34E-02	8,46E+07	1,92E+08	3,87E+08	8,46E+07	2,21E+08	2,74E+08	7,94E+07	1,87E+08	3,72E+08
1,36E-02	8,43E+07	1,92E+08	3,87E+08	8,43E+07	2,22E+08	2,73E+08	7,91E+07	1,87E+08	3,71E+08
1,38E-02	8,41E+07	1,92E+08	3,87E+08	8,41E+07	2,22E+08	2,73E+08	7,89E+07	1,87E+08	3,71E+08
1,40E-02	8,39E+07	1,92E+08	3,87E+08	8,39E+07	2,22E+08	2,73E+08	7,87E+07	1,87E+08	3,71E+08
1,42E-02	8,37E+07	1,92E+08	3,87E+08	8,37E+07	2,22E+08	2,73E+08	7,85E+07	1,87E+08	3,71E+08
1,44E-02	8,34E+07	1,92E+08	3,87E+08	8,34E+07	2,22E+08	2,72E+08	7,83E+07	1,87E+08	3,71E+08
1,46E-02	8,32E+07	1,92E+08	3,86E+08	8,32E+07	2,22E+08	2,72E+08	7,81E+07	1,88E+08	3,71E+08
1,48E-02	8,30E+07	1,92E+08	3,86E+08	8,30E+07	2,22E+08	2,72E+08	7,79E+07	1,88E+08	3,70E+08



1,50E-02	8,28E+07	1,92E+08	3,86E+08	8,28E+07	2,22E+08	2,71E+08	7,76E+07	1,88E+08	3,70E+08
1,52E-02	8,26E+07	1,92E+08	3,86E+08	8,26E+07	2,22E+08	2,71E+08	7,74E+07	1,88E+08	3,70E+08
1,54E-02	8,23E+07	1,92E+08	3,86E+08	8,23E+07	2,23E+08	2,71E+08	7,72E+07	1,88E+08	3,70E+08
1,67E-02	6,98E+07	2,48E+07	7,22E+07	6,98E+07	3,47E+07	3,53E+07	6,46E+07	2,18E+07	8,11E+07
1,80E-02	3,80E+07	4,66E+07	4,70E+07	3,80E+07	5,30E+07	3,64E+07	4,32E+07	3,95E+07	4,21E+07
1,94E-02	1,42E+08	5,53E+07	3,66E+07	1,42E+08	7,29E+06	4,23E+07	1,43E+08	5,11E+07	4,19E+07
2,07E-02	1,35E+08	3,68E+06	2,60E+07	1,35E+08	3,49E+07	2,46E+07	1,98E+08	3,63E+06	2,75E+07
2,47E-02	3,48E+07	2,13E+07	2,12E+07	3,48E+07	1,70E+07	1,62E+07	2,28E+07	1,83E+07	2,42E+07
2,60E-02	3,50E+07	1,40E+07	2,67E+07	3,50E+07	4,02E+06	2,21E+07	3,29E+07	1,09E+07	2,84E+07
2,74E-02	2,20E+07	8,49E+06	3,19E+07	2,20E+07	3,82E+06	2,98E+07	2,05E+07	5,39E+06	3,15E+07
2,87E-02	9,14E+06	2,94E+06	3,71E+07	9,14E+06	1,17E+07	3,76E+07	8,17E+06	1,23E+05	3,47E+07



Jarak	673 K searah			873 K bolak-balik			873 K searah		
	t = 1	t = 24	t = 72	t = 1	t = 24	t = 72	t = 1	t = 24	t = 72
0	1,76E+07	1,36E+07	4,20E+07	1,79E+07	2,62E+06	4,33E+07	1,79E+07	1,30E+07	4,20E+07
1,34E-03	2,02E+07	4,01E+06	2,80E+07	2,06E+07	1,69E+07	3,19E+07	2,06E+07	4,77E+06	2,79E+07
2,67E-03	2,29E+07	2,16E+07	1,40E+07	2,32E+07	3,12E+07	2,05E+07	2,32E+07	2,25E+07	1,37E+07
4,01E-03	1,42E+07	4,21E+07	5,03E+06	1,42E+07	4,56E+07	1,19E+07	1,42E+07	4,30E+07	4,60E+06
5,34E-03	2,93E+07	7,13E+07	1,12E+07	3,07E+07	6,01E+07	1,18E+07	3,07E+07	7,17E+07	1,08E+07
6,68E-03	7,28E+07	1,00E+08	1,74E+07	7,56E+07	7,46E+07	1,17E+07	7,56E+07	1,00E+08	1,70E+07
8,01E-03	1,53E+08	5,31E+07	2,32E+07	1,55E+08	2,07E+07	2,79E+07	1,55E+08	5,28E+07	2,39E+07
9,35E-03	1,44E+08	2,31E+06	4,88E+07	1,44E+08	5,16E+07	4,85E+07	1,44E+08	2,17E+06	4,88E+07
1,07E-02	3,80E+07	5,03E+07	2,42E+07	3,69E+07	4,19E+07	3,86E+07	3,69E+07	5,17E+07	2,65E+07
1,20E-02	6,16E+07	3,60E+07	3,14E+07	6,27E+07	2,35E+07	7,63E+07	6,27E+07	3,73E+07	3,33E+07
1,34E-02	7,94E+07	2,00E+08	2,39E+08	8,05E+07	1,88E+08	3,76E+08	8,05E+07	2,09E+08	2,51E+08
1,36E-02	7,91E+07	2,01E+08	2,38E+08	8,02E+07	1,88E+08	3,76E+08	8,02E+07	2,09E+08	2,51E+08
1,38E-02	7,89E+07	2,01E+08	2,38E+08	8,00E+07	1,88E+08	3,76E+08	8,00E+07	2,09E+08	2,51E+08
1,40E-02	7,87E+07	2,01E+08	2,38E+08	7,98E+07	1,88E+08	3,76E+08	7,98E+07	2,09E+08	2,51E+08
1,42E-02	7,85E+07	2,01E+08	2,38E+08	7,96E+07	1,88E+08	3,75E+08	7,96E+07	2,09E+08	2,50E+08
1,44E-02	7,83E+07	2,01E+08	2,37E+08	7,94E+07	1,88E+08	3,75E+08	7,94E+07	2,10E+08	2,50E+08
1,46E-02	7,81E+07	2,01E+08	2,37E+08	7,92E+07	1,88E+08	3,75E+08	7,92E+07	2,10E+08	2,50E+08



1,48E-02	7,79E+07	2,01E+08	2,37E+08	7,90E+07	1,88E+08	3,75E+08	7,90E+07	2,10E+08	2,49E+08
1,50E-02	7,76E+07	2,01E+08	2,37E+08	7,87E+07	1,88E+08	3,75E+08	7,87E+07	2,10E+08	2,49E+08
1,52E-02	7,74E+07	2,02E+08	2,36E+08	7,85E+07	1,88E+08	3,74E+08	7,85E+07	2,10E+08	2,49E+08
1,54E-02	7,72E+07	2,02E+08	2,36E+08	7,83E+07	1,88E+08	3,74E+08	7,83E+07	2,10E+08	2,49E+08
1,67E-02	6,46E+07	3,48E+07	3,42E+07	6,57E+07	2,30E+07	7,97E+07	6,57E+07	3,61E+07	3,62E+07
1,80E-02	4,32E+07	4,92E+07	2,86E+07	4,21E+07	4,04E+07	4,36E+07	4,21E+07	5,06E+07	3,09E+07
2,34E-02	5,60E+07	4,51E+07	1,72E+07	5,73E+07	3,21E+07	1,64E+07	5,73E+07	4,57E+07	1,70E+07
2,47E-02	2,28E+07	1,50E+07	1,70E+07	2,30E+07	1,91E+07	2,36E+07	2,30E+07	1,57E+07	1,68E+07
2,60E-02	3,29E+07	1,65E+06	2,20E+07	3,33E+07	1,17E+07	2,80E+07	3,33E+07	2,28E+06	2,21E+07
2,74E-02	2,05E+07	6,24E+06	2,86E+07	2,08E+07	6,12E+06	3,16E+07	2,08E+07	5,68E+06	2,91E+07
2,87E-02	8,17E+06	1,41E+07	3,53E+07	8,38E+06	5,46E+05	3,52E+07	8,38E+06	1,36E+07	3,60E+07



**TABEL TEGANGAN SISA PADA PENGELASAN SUDU TURBIN INCONEL 792**

Jarak	Temp 473 K Bolak-balik	Temp 473 K Searah	Temp 673 K Bolak-balik	Temp 673 K Searah	Temp 873 K Bolak-balik	Temp 873 K Searah
0	-4,19E+07	-4,08E+07	-4,37E+07	-4,20E+07	-4,33E+07	-4,20E+07
1,34E-03	-3,02E+07	-2,68E+07	-3,23E+07	-2,80E+07	-3,19E+07	-2,79E+07
2,67E-03	-1,85E+07	-1,29E+07	-2,09E+07	-1,40E+07	-2,05E+07	-1,37E+07
4,01E-03	-9,65E+06	-3,83E+06	-1,24E+07	-5,03E+06	-1,19E+07	-4,60E+06
5,34E-03	-9,56E+06	-9,73E+06	-1,22E+07	-1,12E+07	-1,18E+07	-1,08E+07
6,68E-03	-9,46E+06	-1,56E+07	-1,21E+07	-1,74E+07	-1,17E+07	-1,70E+07
8,01E-03	2,76E+07	2,55E+07	2,80E+07	2,32E+07	2,79E+07	2,39E+07
9,35E-03	4,41E+07	4,79E+07	4,96E+07	4,88E+07	4,85E+07	4,88E+07
1,07E-02	-4,18E+07	-3,18E+07	-3,74E+07	-2,42E+07	-3,86E+07	-2,65E+07
1,20E-02	-6,87E+07	-3,21E+07	-7,77E+07	-3,14E+07	-7,63E+07	-3,33E+07
1,34E-02	3,87E+08	2,74E+08	3,72E+08	2,39E+08	3,76E+08	2,51E+08
1,36E-02	3,87E+08	2,73E+08	3,71E+08	2,38E+08	3,76E+08	2,51E+08
1,38E-02	3,87E+08	2,73E+08	3,71E+08	2,38E+08	3,76E+08	2,51E+08
1,40E-02	3,87E+08	2,73E+08	3,71E+08	2,38E+08	3,76E+08	2,51E+08
1,42E-02	3,87E+08	2,73E+08	3,71E+08	2,38E+08	3,75E+08	2,50E+08
1,44E-02	3,87E+08	2,72E+08	3,71E+08	2,37E+08	3,75E+08	2,50E+08



1,46E-02	3,86E+08	2,72E+08	3,71E+08	2,37E+08	3,75E+08	2,50E+08
1,48E-02	3,86E+08	2,72E+08	3,70E+08	2,37E+08	3,75E+08	2,49E+08
1,50E-02	3,86E+08	2,71E+08	3,70E+08	2,37E+08	3,75E+08	2,49E+08
1,52E-02	3,86E+08	2,71E+08	3,70E+08	2,36E+08	3,74E+08	2,49E+08
1,54E-02	3,86E+08	2,71E+08	3,70E+08	2,36E+08	3,74E+08	2,49E+08
1,67E-02	-7,22E+07	-3,53E+07	-8,11E+07	-3,42E+07	-7,97E+07	-3,62E+07
2,34E-02	-1,48E+07	-1,57E+07	-1,67E+07	-1,72E+07	-1,64E+07	-1,70E+07
2,47E-02	-2,12E+07	-1,62E+07	-2,42E+07	-1,70E+07	-2,36E+07	-1,68E+07
2,60E-02	-2,67E+07	-2,21E+07	-2,84E+07	-2,20E+07	-2,80E+07	-2,21E+07
2,74E-02	-3,19E+07	-2,98E+07	-3,15E+07	-2,86E+07	-3,16E+07	-2,91E+07
2,87E-02	-3,71E+07	-3,76E+07	-3,47E+07	-3,53E+07	-3,52E+07	-3,60E+07

**TABEL DISTORSI PENGELASAN PADA SUMBU, X, Y DAN Z**

Jarak	473 K bolak-balik			473 K searah			673 K bolak-balik		
	sumbu x	sumbu y	sumbu z	sumbu x	sumbu y	sumbu z	sumbu x	sumbu y	sumbu z
0	-5,27E-05	3,99E-05	-6,72E-06	-5,32E-05	3,89E-05	-6,73E-06	-4,86E-05	3,64E-05	-6,33E-06
1,34E-03	-5,36E-05	4,69E-05	-7,59E-06	-5,44E-05	4,58E-05	-7,64E-06	-4,94E-05	4,26E-05	-7,07E-06
2,67E-03	-5,45E-05	5,39E-05	-8,46E-06	-5,55E-05	5,28E-05	-8,55E-06	-5,03E-05	4,89E-05	-7,81E-06
4,01E-03	-5,49E-05	6,12E-05	-9,37E-06	-5,61E-05	6,01E-05	-9,51E-06	-5,07E-05	5,54E-05	-8,61E-06
5,34E-03	-5,38E-05	6,98E-05	-1,04E-05	-5,50E-05	6,86E-05	-1,06E-05	-4,98E-05	6,30E-05	-9,56E-06
1,20E-02	-3,17E-05	1,23E-04	-1,29E-05	-3,56E-05	1,20E-04	-1,27E-05	-3,11E-05	1,11E-04	-1,24E-05
1,34E-02	-2,64E-05	1,29E-04	-1,33E-05	-2,94E-05	1,27E-04	-1,31E-05	-2,78E-05	1,16E-04	-1,26E-05
1,36E-02	-2,65E-05	1,29E-04	-1,49E-05	-2,95E-05	1,27E-04	-1,47E-05	-2,78E-05	1,16E-04	-1,40E-05
1,38E-02	-2,65E-05	1,29E-04	-1,64E-05	-2,95E-05	1,27E-04	-1,63E-05	-2,79E-05	1,16E-04	-1,54E-05
1,40E-02	-2,66E-05	1,29E-04	-1,80E-05	-2,96E-05	1,27E-04	-1,79E-05	-2,79E-05	1,16E-04	-1,68E-05
1,42E-02	-2,66E-05	1,28E-04	-1,96E-05	-2,96E-05	1,27E-04	-1,95E-05	-2,80E-05	1,16E-04	-1,81E-05
1,44E-02	-2,67E-05	1,28E-04	-2,12E-05	-2,97E-05	1,27E-04	-2,11E-05	-2,80E-05	1,16E-04	-1,95E-05
1,46E-02	-2,67E-05	1,28E-04	-2,27E-05	-2,98E-05	1,27E-04	-2,27E-05	-2,81E-05	1,15E-04	-2,09E-05
1,48E-02	-2,68E-05	1,28E-04	-2,43E-05	-2,98E-05	1,26E-04	-2,42E-05	-2,81E-05	1,15E-04	-2,23E-05
1,50E-02	-2,68E-05	1,28E-04	-2,59E-05	-2,99E-05	1,26E-04	-2,58E-05	-2,82E-05	1,15E-04	-2,37E-05
1,52E-02	-2,69E-05	1,28E-04	-2,75E-05	-2,99E-05	1,26E-04	-2,74E-05	-2,82E-05	1,15E-04	-2,50E-05







Jarak	673 K searah			873 K bolak-balik			873 K searah		
	sumbu x	sumbu y	sumbu z	sumbu x	sumbu y	sumbu z	sumbu x	sumbu y	sumbu z
0	-4,90E-05	3,55E-05	-6,32E-06	-4,94E-05	3,72E-05	-6,43E-06	-4,99E-05	3,62E-05	-6,42E-06
1,34E-03	-5,01E-05	4,17E-05	-7,11E-06	-5,03E-05	4,35E-05	-7,20E-06	-5,10E-05	4,26E-05	-7,24E-06
2,67E-03	-5,12E-05	4,79E-05	-7,90E-06	-5,12E-05	4,99E-05	-7,98E-06	-5,21E-05	4,89E-05	-8,06E-06
4,01E-03	-5,18E-05	5,44E-05	-8,74E-06	-5,16E-05	5,67E-05	-8,80E-06	-5,27E-05	5,56E-05	-8,93E-06
5,34E-03	-5,09E-05	6,20E-05	-9,74E-06	-5,07E-05	6,45E-05	-9,78E-06	-5,17E-05	6,34E-05	-9,96E-06
6,68E-03	-4,99E-05	6,97E-05	-1,07E-05	-4,98E-05	7,23E-05	-1,08E-05	-5,08E-05	7,12E-05	-1,10E-05
1,07E-02	-3,87E-05	1,01E-04	-1,22E-05	-3,61E-05	1,06E-04	-1,24E-05	-3,91E-05	1,03E-04	-1,25E-05
1,20E-02	-3,40E-05	1,09E-04	-1,20E-05	-3,12E-05	1,14E-04	-1,26E-05	-3,43E-05	1,11E-04	-1,22E-05
1,34E-02	-2,85E-05	1,16E-04	-1,21E-05	-2,75E-05	1,19E-04	-1,28E-05	-2,86E-05	1,18E-04	-1,24E-05
1,36E-02	-2,86E-05	1,15E-04	-1,36E-05	-2,75E-05	1,19E-04	-1,42E-05	-2,86E-05	1,18E-04	-1,39E-05
1,38E-02	-2,86E-05	1,15E-04	-1,51E-05	-2,76E-05	1,19E-04	-1,56E-05	-2,87E-05	1,18E-04	-1,54E-05
1,40E-02	-2,87E-05	1,15E-04	-1,65E-05	-2,76E-05	1,19E-04	-1,70E-05	-2,87E-05	1,18E-04	-1,69E-05
1,42E-02	-2,87E-05	1,15E-04	-1,80E-05	-2,77E-05	1,19E-04	-1,85E-05	-2,88E-05	1,18E-04	-1,84E-05
1,44E-02	-2,88E-05	1,15E-04	-1,95E-05	-2,77E-05	1,18E-04	-1,99E-05	-2,88E-05	1,18E-04	-1,99E-05
1,46E-02	-2,88E-05	1,15E-04	-2,10E-05	-2,78E-05	1,18E-04	-2,13E-05	-2,89E-05	1,17E-04	-2,14E-05
1,48E-02	-2,89E-05	1,15E-04	-2,24E-05	-2,78E-05	1,18E-04	-2,27E-05	-2,89E-05	1,17E-04	-2,29E-05
1,50E-02	-2,89E-05	1,15E-04	-2,39E-05	-2,78E-05	1,18E-04	-2,42E-05	-2,90E-05	1,17E-04	-2,44E-05

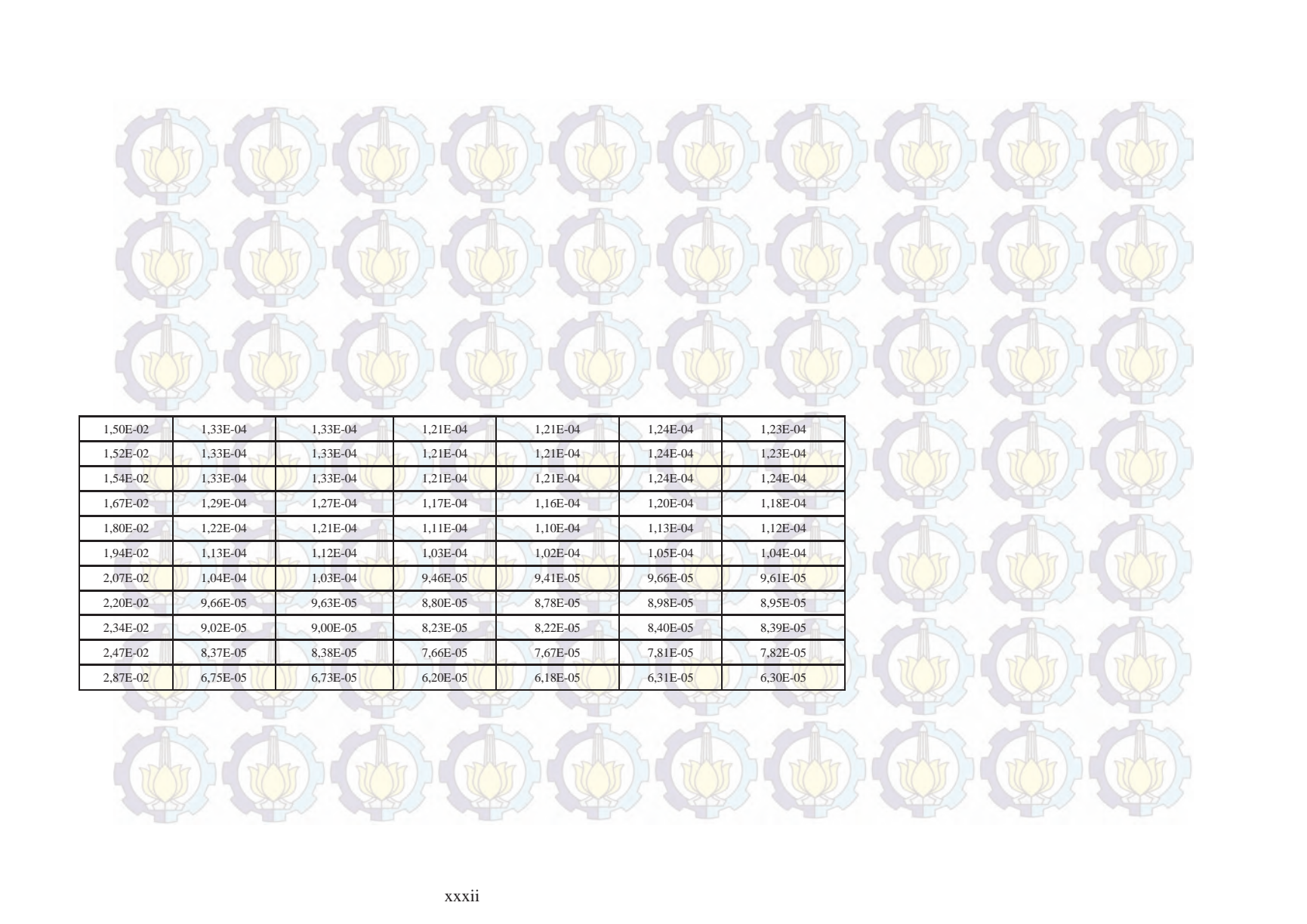
1,52E-02	-2,89E-05	1,14E-04	-2,54E-05	-2,79E-05	1,18E-04	-2,56E-05	-2,90E-05	1,17E-04	-2,59E-05
1,54E-02	-2,90E-05	1,14E-04	-2,68E-05	-2,79E-05	1,18E-04	-2,70E-05	-2,91E-05	1,17E-04	-2,74E-05
1,67E-02	-3,45E-05	1,08E-04	-2,52E-05	-3,16E-05	1,12E-04	-2,53E-05	-3,48E-05	1,10E-04	-2,57E-05
1,80E-02	-3,91E-05	9,97E-05	-2,32E-05	-3,65E-05	1,04E-04	-2,35E-05	-3,95E-05	1,02E-04	-2,37E-05
1,94E-02	-4,35E-05	8,94E-05	-2,12E-05	-4,21E-05	9,33E-05	-2,14E-05	-4,40E-05	9,14E-05	-2,17E-05
2,07E-02	-4,77E-05	7,84E-05	-2,00E-05	-4,72E-05	8,16E-05	-2,01E-05	-4,85E-05	8,02E-05	-2,03E-05
2,20E-02	-5,04E-05	6,90E-05	-1,89E-05	-5,01E-05	7,17E-05	-1,91E-05	-5,12E-05	7,05E-05	-1,93E-05
2,34E-02	-5,16E-05	6,09E-05	-1,78E-05	-5,13E-05	6,34E-05	-1,80E-05	-5,25E-05	6,23E-05	-1,81E-05
2,60E-02	-5,21E-05	4,64E-05	-1,55E-05	-5,21E-05	4,84E-05	-1,57E-05	-5,30E-05	4,74E-05	-1,57E-05
2,74E-02	-5,08E-05	4,05E-05	-1,43E-05	-5,10E-05	4,23E-05	-1,45E-05	-5,17E-05	4,13E-05	-1,46E-05
2,87E-02	-4,95E-05	3,45E-05	-1,32E-05	-5,00E-05	3,61E-05	-1,34E-05	-5,05E-05	3,52E-05	-1,35E-05



**TABEL DISTORSI TOTAL PADA PENGELASAN SUDU TURBIN INCONEL 792**

Jarak	Temp 473 K Bolak-balik	Temp 473 K Searah	Temp 673 K Bolak-balik	Temp 673 K Searah	Temp 873 K Bolak-balik	Temp 873 K Searah
0	6,64E-05	6,62E-05	6,10E-05	6,08E-05	6,22E-05	6,20E-05
2,67E-03	7,73E-05	7,73E-05	7,07E-05	7,07E-05	7,21E-05	7,21E-05
5,34E-03	8,91E-05	8,90E-05	8,13E-05	8,12E-05	8,29E-05	8,28E-05
6,68E-03	9,53E-05	9,50E-05	8,68E-05	8,66E-05	8,86E-05	8,84E-05
8,01E-03	1,03E-04	1,02E-04	9,38E-05	9,33E-05	9,58E-05	9,53E-05
9,35E-03	1,13E-04	1,11E-04	1,02E-04	1,01E-04	1,05E-04	1,04E-04
1,07E-02	1,21E-04	1,20E-04	1,10E-04	1,09E-04	1,13E-04	1,11E-04
1,20E-02	1,28E-04	1,26E-04	1,16E-04	1,15E-04	1,19E-04	1,17E-04
1,34E-02	1,32E-04	1,31E-04	1,20E-04	1,20E-04	1,23E-04	1,22E-04
1,36E-02	1,32E-04	1,32E-04	1,20E-04	1,20E-04	1,23E-04	1,22E-04
1,38E-02	1,33E-04	1,32E-04	1,20E-04	1,20E-04	1,23E-04	1,22E-04
1,40E-02	1,33E-04	1,32E-04	1,21E-04	1,20E-04	1,23E-04	1,23E-04
1,42E-02	1,33E-04	1,32E-04	1,21E-04	1,20E-04	1,23E-04	1,23E-04
1,44E-02	1,33E-04	1,32E-04	1,21E-04	1,20E-04	1,23E-04	1,23E-04
1,46E-02	1,33E-04	1,32E-04	1,21E-04	1,20E-04	1,24E-04	1,23E-04
1,48E-02	1,33E-04	1,32E-04	1,21E-04	1,21E-04	1,24E-04	1,23E-04





1,50E-02	1,33E-04	1,33E-04	1,21E-04	1,21E-04	1,24E-04	1,23E-04
1,52E-02	1,33E-04	1,33E-04	1,21E-04	1,21E-04	1,24E-04	1,23E-04
1,54E-02	1,33E-04	1,33E-04	1,21E-04	1,21E-04	1,24E-04	1,24E-04
1,67E-02	1,29E-04	1,27E-04	1,17E-04	1,16E-04	1,20E-04	1,18E-04
1,80E-02	1,22E-04	1,21E-04	1,11E-04	1,10E-04	1,13E-04	1,12E-04
1,94E-02	1,13E-04	1,12E-04	1,03E-04	1,02E-04	1,05E-04	1,04E-04
2,07E-02	1,04E-04	1,03E-04	9,46E-05	9,41E-05	9,66E-05	9,61E-05
2,20E-02	9,66E-05	9,63E-05	8,80E-05	8,78E-05	8,98E-05	8,95E-05
2,34E-02	9,02E-05	9,00E-05	8,23E-05	8,22E-05	8,40E-05	8,39E-05
2,47E-02	8,37E-05	8,38E-05	7,66E-05	7,67E-05	7,81E-05	7,82E-05
2,87E-02	6,75E-05	6,73E-05	6,20E-05	6,18E-05	6,31E-05	6,30E-05

## BIODATA PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Muhammad Zaki Hauna dilahirkan di Jakarta pada tanggal 6 Oktober 1992 dari orang tua bernama Muhammad Jauharul Fuad dan Diah Rosanty. Penulis merupakan anak kedua dari lima bersaudara. Pendidikan formal penulis ditempuh mulai dari SD Bina Insani Bogor, SDN Kebon Baru IV Cirebon, SMP Negeri 1 Cirebon, MA Tahfizhul Qur'an Isy Karima dan terakhir Jurusan Teknik Material & Metalurgi FTI – ITS.

Penulis pernah mengikuti kegiatan kerja praktek di Departemen *Surface Treatment* PT. Dirgantara Indonesia dan magang Tugas Akhir di Departement *Material Process* PT. GMF AeroAsia. Selama menjadi mahasiswa, penulis juga aktif di beberapa kegiatan intra dan ekstra kampus. Penulis pernah menjabat sebagai Ketua Himpunan Mahasiswa Teknik Material & Metalurgi (HMMT) FTI – ITS, Sekretaris jenderal BEM ITS, dan beberapa kegiatan sosial ekstra kampus seperti pengajaran di daerah lokalisasi Dolly. Beragam kegiatan yang penulis ikuti selama menjadi mahasiswa senantiasa memberikan sumbangsih yang besar dalam mengasah kemampuan hardskill, softskill dan jejaring yang dibutuhkan dalam kehidupan.

Pertanyaan, kritikan, dan masukan terhadap penelitian TA penulis dapat dilayangkan melalui alamat yang tertera. Terima kasih.

Nomor HP : 085724822644

E-mail : m.zaki.hauna@gmail.com